



TITLE:

布の力学特性を用いた衣服形状の
動的計算方法(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

坂口, 嘉之

CITATION:

坂口, 嘉之. 布の力学特性を用いた衣服形状の動的計算方法. 京都大学,
1997, 博士(工学)

ISSUE DATE:

1997-03-24

URL:

<https://doi.org/10.11501/3123603>

RIGHT:

布の力学的特性を用いた衣服形状の動的計算方法

坂口嘉之

目次

1 序論	1
2 仮想服飾環境	6
2.1 緒言	6
2.2 仮想服飾環境の概要	6
2.3 仮想服飾環境の構成	13
2.4 衣服の形状計算における要素技術	16
2.5 結言	20
3 布の計算モデル	21
3.1 緒言	21
3.2 数値計算の目標	21
3.3 布のモデル化	22
3.4 座標系と変数	29
3.5 布モデルの原理	33
3.5.1 基本的な布モデル	35
3.6 布の力学特性の測定と定式化	38
3.6.1 引張り試験	38
3.6.2 曲げ試験	39
3.7 KES 法の拡張と測定値の補間計算	42
3.7.1 異方性の計算	42
3.7.2 履歴の計算	43
3.8 布の変形モデル	48
3.8.1 内力の計算	48
3.8.2 布の運動方程式	49

3.9	計算実験	51
3.9.1	異方性計算と実測値の比較	51
3.9.2	実際の布の異方性補間計算	53
3.9.3	ドレープテスト	56
3.9.4	実際の布との比較	57
3.10	考察	57
3.11	結言	60
4	格子形成	63
4.1	諸言	63
4.2	格子形成の分類	63
4.3	格子形成法の原理	65
4.4	初期格子の形成	68
4.4.1	境界適合条件	69
4.4.2	接合条件	69
4.4.3	制約適合条件	69
4.5	初期格子の改良	70
4.5.1	滑らかさの関数	71
4.5.2	せん断変形の関数	72
4.5.3	格子点間隔の関数	72
4.6	型紙と人体形状からの格子形成	73
4.6.1	型紙からの格子形成	73
4.6.2	人体形状からの格子形成	76
4.7	計算実験	77
4.7.1	型紙の格子形成実験	77
4.7.2	人体形状からの格子形成実験	78

4.8	考察	82
4.9	結言	87
5	衝突の計算モデル	89
5.1	諸言	89
5.2	衝突のモデル化	89
5.3	衝突の計算方法	93
5.3.1	交差可能性判定方法	94
5.3.2	衝突の判定方法	97
5.3.3	衝突処理の計算方法	98
5.4	物理モデルと幾何モデルを段階的に併用する衝突モデル	100
5.5	人体の動きに対応する衣服形状計算法	102
5.6	計算実験	104
5.7	考察	112
5.8	結言	115
6	仮想服飾環境の応用	116
6.1	緒言	116
6.2	仮想試着システム	116
6.3	計算実験	117
6.4	考察	119
6.5	結言	119
7	結論	120

内容梗概

近年の計算機の飛躍的な性能向上を背景に、計算機の中に仮想的な世界を構築しようとする研究が増えてきている。しかし、布のように自由度の多い柔軟な物体を仮想世界に実現することは容易ではない。特に、実際の布と同じ特性をもたせようとすると複雑な物理計算が必要になる。

本論文では、布の力学的特性を用いた衣服形状の動的計算方法について述べる。この研究の基本的なアイデアは、幾何学的アプローチと物理的アプローチを正則化により併用したことにある。具体的には、制約として実測の布特性を定式化し、運動方程式の解が制約を満たすように反復修正していく方法（制約充足型アプローチ）で、布や衣服を対象とした計算実験を行い有効性を検討している。

ここで本論文の構成について述べる。第1章で、服飾における生活者と供給側の問題について述べ、研究の理念、及び、論文の構成について述べる。第2章で、仮想服飾環境の概要について述べ、研究の動機となる有用性について述べる。また、仮想服飾環境の構成について述べ、従来の研究を概観し、本論文の位置付けを明確にする。第3章では布モデルについて述べ数値計算実験を行う。ここで提案する布モデルは、制約充足型アプローチによる動的変形モデルであり、非線形な布特性を直接的に計算に取り込み、その動きを計算することができる。またこのモデルは、計算に必要な記憶領域が少なく、計算精度と計算速度のトレードオフができるために、利用目的に合った計算形態が選べる。第4章では、要素分割に必要な格子形成について述べ、型紙格子と人体モデルを作成する。この格子形成方法は、滑らかさ、せん断角度、格子間隔を制約としている。これらの制約は、格子化しようとする対象物が2次元の型紙でも、3次元の人体形状でも共通に適用することができる。第5章では、布と人体、及び、布同士の衝突モデルについて述べ、ワンピースを人体に着せ付ける数値計算実験を行う。制約充足型アプローチでは、衝突の影響も単に制約が1つ増えただけのこととしてシミュレーションに取り込むことができ

る。衝突時に影響を与える摩擦、跳ね返りも考慮した衝突計算方法について述べている。また、人体が動く場合の衝突モデルについて述べ、歩行動作をする人体モデルが着たワンピースの動きの数値計算実験を行う。衣服と人体間の相対速度が大きい場合には、衝突の幾何モデルと物理モデルを段階的に併用することが有用であることを示す。第6章では、仮想服飾環境の応用例として仮想試着システムについて述べる。仮想試着システムでは、1枚の人物写真に、計算で作り出した衣服を着せつけることができる。第7章で本論文のまとめを行うと共に結論を述べる。

1 序論

ファッション¹は、ハイテクと並び21世紀の生活文化向上のための経済・社会の発展の方向を特徴づけるものとして、豊かな未来を実現するための重要な要素であると考えられており、社会のファッション産業に対する期待は大きい[37].

日本では、戦後の着る衣服に事欠く時代から、繊維メーカー主導の大量生産、大量消費時代(1960年代)に入った。その後、画一的な流行の時代は終り、自らのライフスタイルの中で衣服を選択する時代になった。本来の衣服の機能は、(1)生態的機能(体温調節、身体の清浄、身体の保護、生活活動)、(2)個性的機能(個性、審美の表現、社交、儀礼、標識、扮飾)であるが[38]、生態的機能はほとんどの衣服が備えているために、個性的機能が重要視されるようになってきたのである。さらに、放送や出版などのメディアの発達により、人々の価値観も多様化し、個性的なファッションが好まれるようになった。1980年代に急激に成長したDCブランドは、コーディネートされたものの中から自分の好みやサイズ、予算に合わせて選択でき、安心してファッションブルな衣服を身につけられるのもてはやされた。しかし、結局は他人のセンスの押しつけにすぎないことに生活者は気付いてきている。日本を含めて先進国の生活者は、マズローの要求5段階説でいえば、最も高次の自己実現要求(自分らしさを求める)の段階にあり、ファッションによる自己実現の願望は増々大きくなってきている。そして1990年代は生活者主導のファッションの時代になってきた[39].

しかし、生活者が衣服によって自己表現をしたいと思っても、自分がデザインし自分で縫製できる人は極くわずかで、大部分の人は既存の衣服の中から選択するか、既存の衣服を修正するかである。生活者一人一人が自己表現できる衣服を着るためには、ファッション情報を手軽に入手でき、自らファッションを創り出すことを手助けする方法が必要である。

¹ファッションという言葉は、流行を意味するだけでなく、流行商品を取り扱う産業全体を意味している。特に、繊維、アパレル産業がファッション産業を代表する産業である。

一方、供給側（生産者、流通業者）では、大量生産方式からニーズの多様化に応じ小ロット多品種生産方式に移った。しかし、小ロット多品種生産では在庫、売れ残りなどの点で無駄が発生する。現在、「原料から小売りの店頭までをつなぐ供給のパイプラインの中で、生活者にとって価値のないコストや時間を取り除くこと」を目指してQRが推進されている。現時点ではファッション性の低い定番的な商品が対象となっており、ファッション性の高い商品を対象とするには方法論に一段の進歩が必要とされている。生活者のニーズを迅速、適確に把握し、ファッション商品といえども確実に売れる商品をタイムリーに生産し、過剰生産や品切れがないようにすることが供給側の願いである。作ってしまってから売するという現状から、売れ筋をみながら生産する方式へ、更に究極には、生活者が注文した衣服だけを迅速に生産するという方式を目指すべきであろう。

このような供給側の問題に対処するために、CAD（計算機支援による設計）やCAM（計算機支援による製造）に期待がよせられている。ファッション産業と計算機の関係は深く、他の産業に先駆けてCADの導入が行われてきた[40]。これは第一世代CADと呼ばれ、主に電子製図板としての機能を持つ[41]。型紙を座標数値データとして計算機に入力すれば、型紙図面の修正や管理の作業を軽減することができる。設計された型紙のサイズを変更するグレーディングが、第一世代CADの最も威力を発揮できる工程である[42]。CADが普及する前には、グレーダと呼ばれるグレーディング専門職がおかれていたが、今やCADが行う仕事となった。

第一世代CADにシミュレーションとグラフィックスを取り入れたCADは、第二世代CADといわれている[41]。第二世代CADは、二次元図形としての型紙を三次元形状である衣服として計算機で扱うことができる[43]。衣服の製造工程におけるサンプル・メイキング（ファッション・デザインから型紙を設計し、その型紙から実際に衣服を試作し、評価・検討を加える工程）では、一回の試作に数日の時間を要し生産性を高める上でのボトル・ネックとなっている。第二世代CADは、

サンプル・メイキングの工程を数時間のオーダーに短縮するものとして注目されている。

しかし、生活者と供給側（生産者と流通業者）の服飾をめぐる課題の本質は、服飾に関する情報の伝達効率の悪さに起因していると考えられる。つまり、服飾の感性情報を明確に表現するための言語や記号が存在しないために、生活者は実際に存在しない服飾を指定する方法がないし、供給側もできあがった製品しか管理できない。このために、生活者は自分の欲しいファッションが入手できないし、供給側も、どのようなファッションを供給すればよいか分からないことになる。実際に存在しない服飾についてのコミュニケーションが可能になれば、服飾に関する情報伝達効率を高めることができると思われる。

近年、計算機の飛躍的な性能向上を背景に、計算機の中に仮想的な世界を構築しようとするバーチャルリアリティ（人工現実感）の研究が活発に行われている。この技術を利用して、実際には存在しない服飾についてのコミュニケーションを可能にすれば、服飾をめぐる生活者と供給側の課題を解決できる可能性がある。

そこで、本論文では、バーチャルリアリティの技術を使ったファッション創造、コミュニケーション環境（仮想服飾環境）を提案する。仮想服飾環境では、布を人体に合わせながら衣服を作っていくような体験をしつつ、ファッションを作っていくことができる。仮想服飾環境では、現実世界と同じ経験則が成り立っているため、CADを使う場合のような特別な知識は不要である。このために、現実世界よりも便利な環境の中で、オリジナルなファッションの創造活動ができるようになる。また、複数の人間が一つの仮想空間を共有することで、実際には存在しない服飾についてのコミュニケーションも可能になる。

このような仮想服飾環境を構築するためには、実際の布の特性を反映した、衣服形状の数値計算方法を確立しなければならない。本論文では、仮想服飾環境の構築を目的とした、布の力学特性を用いた衣服の動的形状計算方法を中心に述べて

いく。

ここで本論文の構成について述べる。第2章で、仮想服飾環境の概要、及び、研究の動機について述べる。また、仮想服飾環境の構成について述べ、衣服の動的形状計算に関連した研究について概観し、本論文の位置付けを明確にする。

従来の衣服の動的形状計算方法には、物理的アプローチと幾何学的アプローチがある。物理的アプローチでは、弾性体理論や運動方程式などの物理学的方法を用いて、布の形状や動きを計算しようとする。一方、幾何学的アプローチでは、曲面生成理論やアフィン変換などの幾何学的方法を用いて布の形状を計算しようとする。物理的アプローチでは、リアルな形状計算ができるが、計算に時間がかかる。幾何学的アプローチでは、計算は早い、リアルな形状計算や動きの計算はできない。そこで、本論文では、正則化により幾何学的アプローチと物理的アプローチを併用する方法を提案する。そして、このアイデアを、実測の布の力学特性や衝突を制約として定式化し、運動方程式の解が制約を満たすように反復修正していく方法（制約充足型アプローチ）として具体化していく。

衣服の動的形状計算では、布を型紙形状に裁断し、複数の型紙を縫製し、人体に着せつける計算をしなければならない。この計算を行うには、布や人体のような物体をモデル化した構造モデルと、構造モデルの振舞いを数式で表現した数学モデルを確立しなければならない。本論文では、構造モデルと数学モデルを合わせて計算モデルと呼ぶ。具体的には、布の計算モデル、格子化形成（型紙モデル、縫製モデル、人体モデル）、衝突の計算モデルが必要になる。これらは、衣服の動的形状計算に必要な要素技術である。第3章から第5章で、これらの要素技術について述べる。

第3章で、布の計算モデルについて述べ数値計算実験を行う。この布の計算モデルでは、非線形な布特性を制約として定式化し、制約充足型アプローチで布の動きを計算することができる。

型紙モデルと縫製モデル、及び、人体モデルは、格子化形成の方法に依存している。そこで、第4章では、要素分割に必要な格子化形成について述べ、型紙モデルと人体モデルを作成する。この格子形成方法は、滑らかさ、せん断角度、格子間隔を制約としている。そのために、格子化しようとする対象物が2次元の型紙でも、3次元の人体形状でも共通に適用することができる。型紙を縫製可能な格子に分割することができるために、型紙モデルと縫製モデルを得ることができる。

衣服を人体に着せつけるためには、衝突の計算モデルが必要である。第5章で、布と人体、及び、布同士の衝突の計算モデルについて述べ、ワンピースを人体に着せつける数値計算実験を行う。制約充足型アプローチでは、衝突の影響も単に制約が1つ増えただけのこととして扱うことができる。衝突時に影響を与える摩擦、跳ね返りも考慮した衝突計算方法について述べる。さらに、人体が動く場合の衝突モデルについて述べ、歩行動作をする人体モデルが着たワンピースの動きの数値計算実験を行う。衣服と人体間の相対速度が大きい場合には、衝突の幾何モデルと物理モデルを段階的に併用することが有用であることを示す。

第6章では、第3章から第5章で述べた要素技術をもとに、仮想服飾環境の応用例としての仮想試着システムについて述べる。仮想試着システムでは、1枚の人物写真に、計算で作り出した衣服を着せつけることができることを示す。

第7章で本論文のまとめを行うと共に結論を述べる。

2 仮想服飾環境

2.1 諸言

本章では、2.2節で仮想服飾環境の概要と、研究の動機について述べる。2.3節で仮想服飾環境の構成について述べる。仮想服飾環境の核は衣服の形状計算である。2.4節で衣服の形状計算における要素技術について述べる。また、従来の研究を概観し、本論文の位置付けを明確にする。

2.2 仮想服飾環境の概要

仮想服飾環境 (PARTY: *Physical based environment of Artificial Reality for dress simulation*) は、人体とその動き、衣服をも含めた服飾要素及び、バックグラウンドとなる環境を、物理的な法則に基づく計算により、計算機の内部に構築しようとする試みである [15]。仮想服飾環境は、(1) 服飾、(2) 人体、(3) 環境、の三つの要素から構成される。服飾は、人体が身につける衣服やアクセサリ類である。衣服には、布の物性値と型紙形状、縫製情報の他、必要に応じて、裏地や肩パッド、芯布などの情報を与える。人体は、人体の3次元形状を3角パッチ等で表現した3次元形状データである。この人体形状データに動きを与えて仮想服飾環境の中で動かす。環境は、人体が置かれている場所の背景や周囲の要素 (椅子やテーブルの他に、重力や空気抵抗、さらには、外部からの操作環境を含む) からなる。

仮想服飾環境において、人体が動けばその動きに伴って衣服形状が変化する。操作者は、人体や衣服要素、環境に対して外部から操作を加えることができる。その操作による影響は、計算機で実時間に計算されグラフィックスによって結果が表示される。これは図1に示すように、衣服を着ずに鏡の前に立つと、その鏡の中には衣服を着た自分の姿が写っているような「魔法の鏡」の概念に近い。鏡の前で様々な姿勢をとると、鏡の中の自分も、衣服を着た状態で様々な姿勢をとっている状況が映し出される。これにより、その衣服が自分に似合っているか、仕立て直する

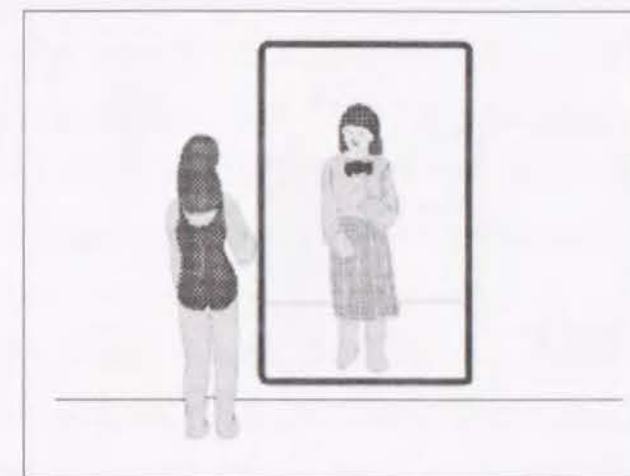


図 1: 仮想服飾環境は魔法の鏡

部分はどこか、などを知ることができる。このような魔法の鏡は、カタログショッピングで衣服を選定する場合に、仮想世界で試着を可能にするものである。

さらに、服飾に関する仮想現実世界は、他にも様々な利用方法が考えられる。まず、テキスタイル分野のユーザには、テキスタイルの設計に関する様々な知見を与えることができる。すなわち、現状のテキスタイルの特性から、どのように改良を加えれば目的のテキスタイルを創り出せるか、の指標が得られる。また、仮想服飾環境では、数値データによりテキスタイルの形状特性が提示できるので、定量的なテキスタイルの評価が可能となる。これは、従来のテキスタイルの評価が定性的で、感性的な評価しかできなかったことを考えると、実用性の高い技術であると言える。

また、アパレル分野のユーザにも多くの利点がある。仮想服飾環境を使って、現実に行っているアパレル設計の作業を計算機の中で実行できる。例えば、図2に示すように、計算機の内部にアパレル工房を構築すれば、操作者は、その工房の中を自由に歩き回り、デザイン画を描いたり、型紙を設計したり、マネキンに衣服を着せ付けたりできる。型紙に布の力学特性を与え、マネキンに着せ付けることで、布

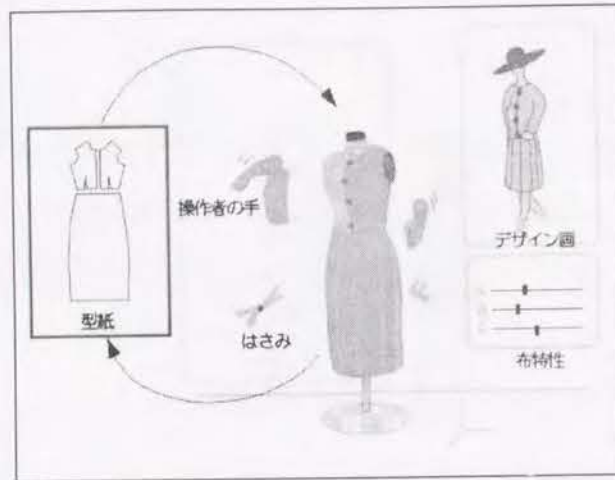


図 2: 仮想的なアパレル工房

の生地動きや、自然に発生するドレープ性を見ることができる。はさみのメタファーを操作して、マネキンに着せ付けたスカートのすそを切り取ると、その影響は、即座に型紙形状に反映される。操作者は、このような体験を通して、より新しい衣服のデザインを創造していくことができる。

このような操作はマン・マシン・インターフェースが良くできていれば、複雑な CAD の操作を習得していなくとも、操作者は目的の仕事を進めることができる。また、計算機が作り出す仮想環境でも、現実世界と同じ物理法則が成り立っていれば、シミュレーションのための特別な知識も不要である。操作者は、現実世界よりも便利な世界で自由に芸術的な創作活動に専念することができる。

生活者は、デパートや専門店に行かなくても、自分の好みにあった衣服をホームショッピングで選択することができるようになる。カタログショッピングと違って、自分の体が目的の衣服を着ている状況を観察することも可能である。さらに、自分の体にフィットするように衣服を修正することも可能になる。

このような仮想服飾環境と前章で述べた第二世代 CAD との大きな違いは、衣服の形状計算において、前者が動的な動きを実時間で計算する動的形状計算である

のに対して、後者では力の釣合から安定形状を計算する静的形状計算である。この違いは、利用目的や表現力において本質的なものである。つまり、動的形状計算の結果からは、その衣服の動きから、衣服が柔らかい素材からできているのか、堅い素材からできているのか、さらには風合いはどうか、といった感性的な情報までも感じることができる。このような情報は、静的形状計算の結果からは知ることができない。

また、静的形状計算では、与えられた力と初期形状、布の特性値から唯一の衣服形状が定まるとする仮定が成り立たなければならない。しかし、布は本質的に多安定であり、その形状は変形過程の履歴に依存する。静的形状計算では、衣服形状はその初期形状に依存するので、操作者が望む衣服形状を算出するためには適切な初期形状を設定する必要がある。しかしこの設定は難しく、試行錯誤を行わなければならない。動的形状計算では、変形過程において操作者が衣服形状に操作を加えることも可能であるために、初期形状の設定は容易である。変形計算が十分早く計算できれば、計算機の中で、あたかも現実布を手にとって扱っているかのように操作できるようになる。これにより、操作は非常に簡単なものとなる。また、変形過程の履歴も計算結果に影響を与えるので、現実の布形状に近い結果を得ることができる。布を計算機で扱えるようになると、衣服の設計段階での試作にかかる手間や時間、費用の節約にもなり生産性が向上する。

さらに、仮想服飾環境を共有環境としたデザインに関するコミュニケーションの手段にもなる。アパレルのような感性領域の表現をうまく行える言語が存在しないことは、独創的なデザインの創造を阻害する要因である。通常は、デザイン画や言葉の持つイメージを組み合わせ、人間同士の間で同じイメージを共有できるまで意見の交換がなされる。これは非常に時間のかかる作業になり、生産性の低下につながっている。また、デザイナーのイメージが完全に伝わらず、結果として独創的なデザインが創造されないことにもなる。仮想環境では、コンピュータネットワーク

クを通じて複数の人間の間で、グラフィックスのイメージを共有しながら協調的に作業を進めることもできる。さらには、衣服形状に操作を加えて、部分的に寸法を変更したり、衣服のシルエットを変えたりして検討することもできる。これは、デザインに関する新しいコミュニケーションの手段になる。コミュニケーションが円滑に行えるようになれば、生産性が向上するだけでなく、製品の質も向上し、デザイナーのイメージに近い製品が製造できるなど、大きな効果が期待できる。

このようなコミュニケーションは、アパレルだけに限らず、関連産業との情報交換にも役立つ。例えば、素材について考えると、衣服の生地の種類は、非常に多種多様である。一般に定番品と呼ばれるレギュラー商品を除けば、大部分が一定の期間だけに生産される商品であり通常は市場に出回ってはいない。このために、アパレル側から必要な素材を指定して要求することは困難であり、ファッションデザイナーは、テキスタイルメーカから提供された素材を基に、その素材を生かすようなデザインを考えているのが現状である。仮想環境では、布の物性値や、光学特性を変えながら様々な数値計算を行える。この結果から、デザイナーは自分のイメージを作り上げるために適切な素材がどれかを知ることができる。これを実際に実行しようとする、非常に多くの種類の生地を用意し、多くの試作を繰り返さなければならず、事実上不可能に近いことであるので計算の方が適している。計算でデザインに適切な素材を選択できれば、テキスタイルメーカにその生地の提供を依頼することができるようになる。これにより、デザイナーは自分のイメージを作り上げるための素材を手に入れることができる。素材に適したデザイン作りの仕事から、デザイン作りのための素材選びの仕事に変わるのである。

さらに、仮想環境は、従来の入力から出力までに時間のかかるバッチ式処理とは異なり、基本的にリアルタイム（操作者の入力に対して数秒以内）で結果が返ってくるので、その応答は、デザインの発想の刺激にもなる。これは、体験的で試行的なデザインの手法を提供するといえる。人体モデルに顧客の人体形状を用い、人体

に布をピンで止めながら縫製を行ったり、着装状態の人体を任意の断面で切断し、断面形状を観察することでゆとり量を見ることが出来る。人体の腕にそでを通すような一見複雑な着付け操作も、そでが人体を半透過的にすり抜けるようにすれば簡単である。また、衣服が人体に適合するように縮ませたり膨らませたりすることも可能である。これは、3次元的なグレーディングに相当しオーダーメイドの仮縫いのようなことができる。人体形状を適当な部分で切断し、布の特性を与えて平面で展開すれば、人体形状から直接型紙を作ることにもできる。さらには人体形状に一定の動きを与えて、その動きが最も自然にできる衣服を設計することもできる。これは機能的なファッションの創造につながる。人体形状に衣服を着せ、アクセサリ類を付け、華やかな背景の前を歩かせれば、電子ファッション・ショーが開ける。これにより、その衣服を着用する状況をも考慮した、時と場所と状況(T.P.O)に適した総合的な服飾の評価が可能となり、ファッションの企画段階でのプレゼンテーションにも利用できる。また、衣服形状の変化がファッションモデルの動作の違いからくるものか、素材の違い、縫製の違いからくるものかは、判断できないことであるが、仮想服飾環境では、ファッションモデルの動作を一定にしたり、素材特性を同一にしたり、縫製条件も同じにできるので、衣服形状の変化の原因が明確にできる。

コンピュータネットワークが整備された将来においては、生活者が自宅の端末からコンピュータネットワークにアクセスし、自分が衣服を着ている状況の計算結果を見て、自分の好みで修正を行った後に、気に入った衣服の注文をすることも実現できるようになる。コンピュータネットワーク上のカタログ販売の商品イメージやコンテンツの制作にも利用できる。これは、商品の企画段階で、生活者に直接的にニーズを問いかけることにもなり、企画倒れのリスクを軽減できる。

テキスタイルやファッションのデザイン、さらには、生活者の衣服の選択は、経験的で、定性的、感性的であるといえる。仮想服飾環境は、これらの人間的な部分

にアクセスするための手段になると思われる。

2.3 仮想服飾環境の構成

仮想服飾環境では、生活者は自分の体型に適合し、かつ、自分のイメージに近い服飾を、自分の好みから選択したり、実際に着装している状況を見て、試行錯誤的に気に入らないところを修正していくことができる。ここでは、生活者が仮想服飾環境を使って好みの衣服を購入する状況を考える。仮想服飾環境の概念図を図3に示す[6]。

まず、生活者は個人的な好みに基づくファッションイメージ（概念）をもっているとする。さらに、生活者は自分の体型をファッションに関する制約として持ち合わせている。体型情報は3次元的な体型データを登録しておいたり、写真からおおよその体型を推定することなどで入力する。つまり、仮想服飾環境への入力情報はファッションのイメージと体型である。

生活者は仮想服飾環境の中で好みのデザインと生地を選択すると、型紙と布の力学特性（布特性）が決まる。もちろん、生活者は、このデザインと生地の選択を行うこともできる。

体型、型紙、布特性を使って衣服形状計算を行い、生活者の人体に着装した状況の着装イメージ（画像）を生活者に提示する。生地の色や柄は瞬時に変更することができるし、動作の設定や環境の設定を変更して、様々な状況で衣服を着装して歩行している時の衣服の動き方なども提示することができる。生活者は、このような状況の静止画や動画の着装イメージ（画像）を見て、自分のファッションイメージ（概念）との比較ができる。

比較の後、自分のイメージと異なるところがあれば、生活者はデザインや型紙、生地を選び直したり、修正を施したりする。仮想服飾環境は、入力された情報を基に、型紙や布特性を変更し、衣服形状計算を行い、結果を再び生活者に提示する。このサイクルを繰り返せば、やがて生活者のイメージに近いものができあがる。生地の変更に関しては、生活者が布の風合いと布特性と結び付けることは難しいの

で、感性情報と布特性を結び付けたデータベースなどを利用する。さらに、生地と布特性のデータベースなどを使えば、目的のデザインを実現するために適した生地の選択の助けとなる。

生活者が十分に納得がいけば注文手続を行う。これは、ホームショッピングである。発注情報と設計仕様書は自動的に適切なアパレルメーカーに伝送され、製造がなされる。できあがった製品は数日以内に顧客のもとに届けられる。

上述のような自分のファッションを実現する使い方の他にも、季節や環境に合わせて自分の好みの素材を中心に衣服を選択したり、予算や最先端の流行に合った衣服を選択したり、自分の衣服ではなく家族や友人に贈る衣服を選択する、などの使い方もできる。

生活者が自分のファッションを選択する方法としてカタログショッピングがあるが、仮想服飾環境とカタログショッピングとは大きな違いがある。カタログショッピングでは、生活者がカタログにある商品の写真を見て購入を検討する。最近のカタログショッピングでは、商品の衣服を着て動く様子のファッションムービーを見ながら、自分がその衣服を着た時の様子を想像して選択を行う、電子ファッションショー形式も登場してきた。しかし、この電子ファッションショーでは、ファッションモデルの体型や動作が生活者のものと異なるために、自分自身がその衣服を身につけた場合には、思っていたものではなかったという問題が起こる。

仮想服飾環境で電子ファッションショーを行えば、自分自身の体型と動作を反映することができる。また、この時の動作を一定動作にしておけば、衣服の動きの美しさの違いも良く分るようになる。

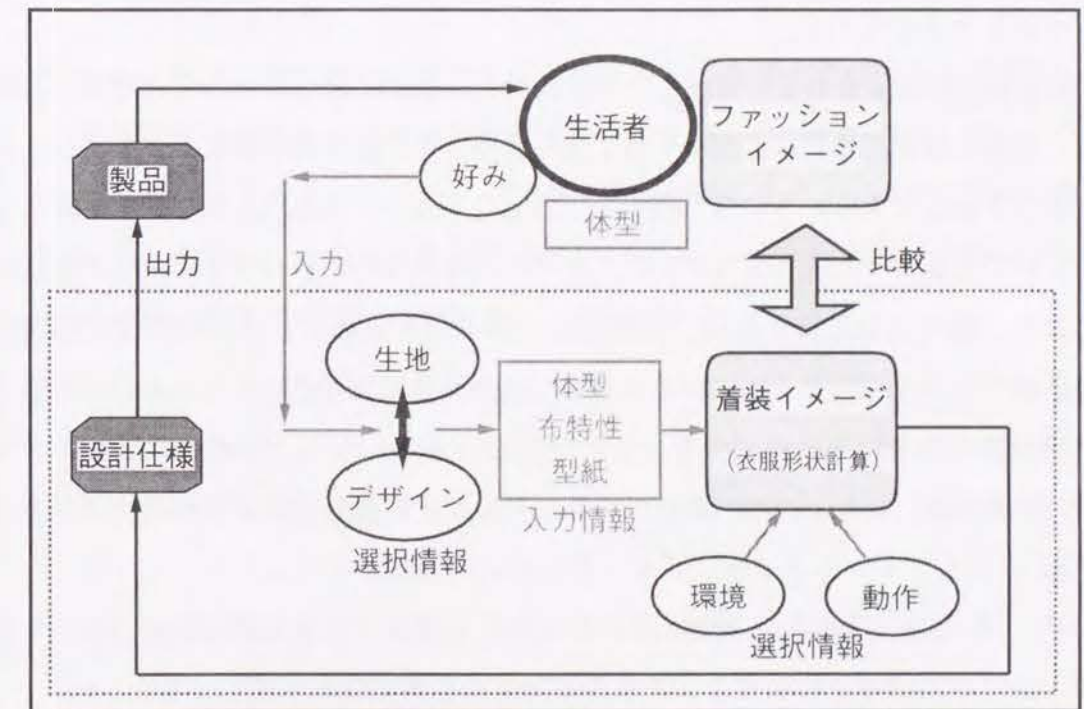


図 3: 仮想服飾環境の概念図

2.4 衣服の形状計算における要素技術

仮想服飾環境の核は衣服の形状計算である。衣服の形状計算に関する研究は、繊維工学の分野とグラフィックスの分野からの報告がある[44]。繊維工学の分野では、布の力学特性を計算する物理学的アプローチがなされてきた。一方、グラフィックスの分野からは、布の幾何学的な形状を計算する幾何学的なアプローチがなされてきた。最近では、布の動きを計算するために、運動方程式を使った物理学的アプローチもなされている。

衣服は、型紙に合わせて切断した布を縫製し、人体に着せつけることで形作られる。衣服の形状計算では、型紙を格子化し各格子点の動きを計算する。型紙は、衣服として縫製できるように格子化しなければならない。また、人体は衣服を着せることができるように人体をモデル化しなければならない。それゆえ、衣服の形状計算には、布の形状計算の他に、型紙形状の格子化や人体モデルの作成などの技術が必要である。このように、システムが比較的大規模なものになるために、衣服の形状計算の研究の報告例が少ないものと思われる。しかし、布の形状計算モデルや、格子形成、人体モデル、衝突の計算モデルなどの要素技術ごとの研究は数多くある。

そこで、仮想服飾環境を構築していこうとする場合に必須の要素技術について説明し、従来の研究を概観する。そして本論文の位置付けを明確にする。

- (I). 布の計算モデル: 実際の布特性を正確に反映した布形状を計算する布の計算モデルには、布の構造モデルと、それを数式で表現した数学モデルが必要である。この時、布の数学モデルは安定で高速な数値解法が採用できることが望ましい。従来、布は連続体としてモデル化がなされてきたが、計算時間がかかるという欠点がある。最近では、離散体としてのモデル化が試みられている。これは、布を構成する縦糸と横糸との交点を微小な粒子でモデル化するものである。

布の計算モデルには、布の静止形状を計算する静的モデルと、布の変形過程を計算する動的モデルがある。仮想服飾環境では動的モデルが必要である。布の動的モデルは、Terzopoulos らにより弾性体理論を用いた研究が行われている[45, 46]。Thalmann らも同様の方法で衣服形状を計算している[47]。しかし、弾性体理論を用いた場合にはステイフネス問題が起こる。これは、布の力学特性を計算に用いた場合に、数値計算に振動や発散が起こり、計算不能になる問題である。

Breen らは、相互作用型粒子モデルを採用し、各粒子間が布の力学特性により制約を受けてるとする布の計算モデルを提案した[48, 49, 50]。布の力学特性を制約とすることで、ステイフネス問題は起こりにくく、布の動的モデルに適している。しかし、制約問題をラグランジェの未定係数法で解いているために、計算に時間がかかるという問題がある。

Breen らの布の力学特性を制約とする考え方で、布の力学特性だけでなく、人体との衝突も制約として扱うことができる。本論文では、Breen らと同様に布の力学特性を制約として考える。しかし、本論文では、制約問題の解き方としてグランジェの未定係数法は使わず、正則化理論を用いることにする。正則化理論を使えば未定係数を算出する必要がなく、そのために計算が早くなる。また、正則化理論ではエネルギー関数を使う必要はなく、制約充足の程度を判定する評価関数的な意味合いが強い。このために、幾何学的な制約も、物理的な制約も統一的に扱うことができるという利点がある。この利点は、物理的な制約と幾何学的な制約を併用するという基本的なアイデアを実現するのに適している。

つまり、本論文の位置付けとしては、

- (a) 布の変形過程を計算する動的モデルである。
- (b) 布の力学特性を制約と見なした、制約充足型アプローチである。

(c) 正則化理論により制約を充足する方法である。

となる。基本的なアイデアは、物理的な制約と幾何学的な制約を正則化により併用することにある。具体的には、制約として実測の布特性を定式化し、運動方程式の解が制約を満たすように反復修正していく方法（制約充足型アプローチ）について検討していく。

(II). 人体モデル: 体型を正確に表現し、関節が可動であり様々な姿勢や動きを与えられる人体モデルが望まれる [3]。従来から、人体モデルにメタボール [51]、ポリゴン [52] が使われてきた。人体台（マネキンスタンド）のような、腕や足のない人体モデルの場合には、楕円体近似が行われることもある [53]。しかし、メタボールでは3次元形状計測による計測値を使うことが難しい。また、単純な楕円体近似では形状精度的に不十分である。

現在のグラフィックスのハードウェアはポリゴン表示に優れているので、人体モデルには3角パッチを用いたサーフェースモデルが最も適している。しかし、衣服が人体と衝突することを考えれば、衝突計算のコストを下げるために、3角パッチの数は可能な限り少なくすることが望ましい。最近では、筋肉や脂肪などの柔軟組織をも含んだ人体モデルの研究もなされている [54]。人体モデルにリアルな動作を与えるには、モーションキャプチャリング技術があるが、測定装置は高価で大がかりなものである。VTR 画像からの動作推定技術 [55] のような手軽な方法が望ましい。

人体モデルに関しての本論文の位置付けは、

- (a) 3角パッチによるサーフェースモデルで人体をモデル化する。
- (b) 関節を可動にし、様々な姿勢や動きを与える。
- (c) 3次元形状計測による計測値から人体モデルを作る。
- (d) 衣服の形状計算に使えるように、少ないデータ量で人体モデルを作る。

となる。本論文では、前後二方向から測定した計測値を制約として、人体モデルの格子形成を行う。これには次に述べる格子形成技術を使う。

(III). 格子形成: 数値計算は離散的な点群の計算になるために、型紙や3次元計測で得られる人体形状データの格子化が必要になる [3]。型紙の格子化では、衣服のどの部分が大きな変形をするかをあらかじめ推定することが難しいために、できるだけ滑らかで均一な格子分割ができることが望ましい。格子には、大きさの異なる3角形パッチの集合からなる不規則格子と、4角形の格子が整然と並んだ規則格子がある。布は、縦糸と横糸が交互に交差した構造を持っているので、型紙の格子化には規則格子が適している。また、縫製に対応するために縫合部分の格子数は同じでなければならないが、規則格子の縫合部分の格子点数を設定することで縫製可能になる。

人体形状データの格子化では、3次元形状計測で得られる人体形状データが、位相幾何学的な構造（どの点とどの点とが接続されているかの情報）を持たないために、格子化によりその構造を与える必要がある。また、3次元形状計測で得られる人体形状データは、膨大なデータ量になるために、データ圧縮をしなければ計算機で扱いにくい。測定した人体形状データをもとに格子形成を行えば、データ圧縮が可能になり、計算機で扱いやすい人体モデルを得ることができる。

格子形成に関しての本論文の位置付けは、

- (a) 布構造（縦糸、横糸）に近い規則格子を用いる。
- (b) できるだけ滑らかで均一な格子分割を行う。
- (c) 縫製に対応する。

となる。

(IV). 衝突の計算モデル: 衣服と人体との間の衝突を計算するために, 布モデルと人体モデル間の衝突の計算モデル [56] [15], ならびに, 布同士の自己衝突の計算モデルが必要である [57]. 衝突は, 衝突側が点であり, 被衝突側がパッチとして計算する. 衝突の計算モデルは, どの点がどのパッチと衝突するかを検出する衝突検出と, 衝突後にどのような運動に変化するかを計算する衝突処理に分けられる. 特に衝突検出は計算コストが高いため, 衣服に隠れた人体部分の形状表現精度を落したり [47], データの構造化を行うなど高速に計算できることが望ましい. 衝突処理では, 作用, 反作用の法則や運動量保存則の物理法則に基づいた処理が必要である.

衝突の計算モデルに関しての本論文の位置付けは,

- (a) 衝突側が点であり, 被衝突側がパッチとして計算する.
- (b) 高速な衝突検出ができるようにする.
- (c) 物理法則に基づいた衝突処理を行う.

となる.

仮想服飾環境を構築するにあたり, まず, 衣服の動的形状計算方法を確立する必要がある. 次章からは, 衣服の動的形状計算に必要な要素技術, 及び, それらを組み合わせた数値計算実験例について述べる.

2.5 結言

仮想服飾環境は, バーチャルリアリティの技術を使って, 服飾に関する仮想的な環境を構築しようとする試みである. 本章では, 研究の目的となる仮想服飾環境の概要と, 研究の動機について述べた. また, 仮想服飾環境の構成について述べ, 仮想服飾環境の核である, 衣服の形状計算に必要な要素技術について述べた. さらに, 従来の研究を概観し, 本論文の位置づけを明確にした.

3 布の計算モデル

3.1 緒言

本章では, 制約充足型アプローチに基づいた, 布の計算モデルについて述べる [1]. このモデルは, 布の非線形な特性を制約として直接的に扱うことのできる他にも, 観測可能な制約を取り込むことができるという特長がある. さらには, 布の動的変形過程も表現することができる.

3.2節で, 数値計算の目標について述べ, あらかじめ研究のゴールを明確にしておく. 3.3節で従来の布モデルを概観し, 本論文で提案する布モデルの位置付けを明確にする. 3.4節で, 説明に使用する変数と座標系について述べる. 3.5節で布モデルの原理について述べる. 3.6節では, 布力学特性の測定方法の一つである, KES法を取り上げ測定内容を定式化し, 布モデルの制約条件とする. 3.7節ではKES法を拡張し, 異方性や履歴を計算で扱えるようにする. 3.8節では, 動的な布の変形を計算できる布モデルについて述べる. 3.9節では, 布モデルを使った数値計算実験を行い結果を検討する. 3.10節では考察を行い問題点を明確にする.

3.2 数値計算の目標

数値計算の理想は, 実際の布の力学特性を用いた, 布モデルの数値計算結果が, 実際の布と同様の振る舞いをし, 同様の安定形状を持つことである. しかし, 布は本質的に多安定であり, その振る舞いや, 振る舞いの最終結果としての安定形状はカオス的であり, わずかな初期条件の違いや, 変形過程の違いで大きく変わってくる. また布の力学特性も, 実際には布の部位によってばらつきがある. 実際の布においても, 安定形状は再現性良く測定できず, かなり大きくばらつく. このために, 数値計算の結果と実際の布の形状が完全に一致することは期待できない. 実際の布においても安定形状は試行のたびに異なるのが普通である.

そこで, 計算による安定形状が, 実際の布にも存在することが, 数値計算におけ

る必要条件になる。これは、実際の布の安定形状に手を加えて、計算による安定形状の形に近付けても、安定であるかどうかを問題とすることになる。

さらに、従来からの布のドレープ性の評価は、視覚による定性的なものであり、多分に人間の感性によるものである。評価者は、ドレープのノード形状に注目しているという実験結果もある [58]。それゆえ、数値計算の結果は、評価者としての人間が数値計算結果を見て、実際の布を見たときの感覚に近い印象を持つことが、数値計算における十分条件であると考えられる。もっと単純には、“この布は、綿よりは絹の様に見える”、“この布より、こちらの布の方が柔らかそうに見える”、この布より、こちらの布のドレープの方が好ましい”といった情報を読み取ることができ、その形状が実際にも存在するならば必要十分条件を満たしていると考えられる。

このような理由から、数値計算の評価を人間に求め、“評価者としての人間の感覚と矛盾しない数値計算結果が得られる”ならば有効な数値計算ができたと判断する。

3.3 布のモデル化

布は、編み物、織物と不織布に大別できるが、衣服に用いられるのは主に編み物か織物である。本論文では織物に注目し、布という言葉は織物を指すものとして用いる。布は、縦糸と横糸が交互に交差するよう組み立てられた構造物であり、縦糸と横糸を結び付けている力は摩擦力である。従って、織物の構造は内部摩擦力で構成されている。これに対して金属箔やプラスチックフィルム、ゴム膜では、分子レベルの結合力で構造が構成されているので、この構造的な違いは本質的なものである。特に、摩擦の機構は非常に複雑であり、数学的なモデル化が難しいものの一つである。

一方、布は非常に自由度が大きく柔軟な振舞いをする。その動きは、3次元的であり大変形を伴うことが特徴である。布と同じように柔軟な振舞いをする物体には、“紙”や“ゴム膜”がある。今、それぞれの物体を引き伸ばそうと力を加えた状

況を考える。“紙”はほとんど伸びず、そのため紙の内部にエネルギーを蓄えることはない。これに対して“ゴム膜”は、大きく伸び、“ゴム膜”の内部にエネルギーを蓄える。布は、“紙”と“ゴム膜”との中間的な物体としての位置付けになると考えられ、内部摩擦の影響が大きい物体中の内部でエネルギーを消費する。そのために、見かけ上、エネルギーの保存則が成立しない。このような柔軟な物体の形状を計算するために、従来から、“幾何学的アプローチ”と“物理的アプローチ”がなされてきた。

“幾何学的アプローチ”では、二次元図形を長さを変えずに三次元空間へ写像する関数を作り出すことがテーマとなる。つまり、制約として幾何学的情報から構成される、幾何学的制約を用いる方法である [59]。この方法は、“紙”のような物体の形状計算に有効である。

一方、“物理的アプローチ”では、応力などを計算し、力の釣合を計算することがテーマとなる。つまり、制約として力学的情報から構成される、力学的制約を用いる方法である。この方法は、“ゴム膜”のような物体の振舞いを計算するには有効である。しかしながら、布は、“紙”と“ゴム膜”の性質を両方合わせ持つので、幾何学的制約と力学的制約の両方を考慮する必要がある。つまり、“幾何学的アプローチ”と“物理的アプローチ”を統合したアプローチが必要となってくる。

“物理的アプローチ”では、布の形状を特徴付ける内力の計算に、応力と歪みの関係がフックの法則に従うと仮定する。しかし、実際の布は内部摩擦の影響が大きいために非線型な関係を持つ。例えば、布の伸びが非常に微小な場合には弾性的な性質を示すが、ある程度伸びると塑性的な性質が出てくる。そして、布が引きちぎれるまでの範囲で、弾性特性と塑性特性が入り交じった特性を示し、塑性特性により履歴曲線を描く。伸びの速度が大きい場合には粘性的な性質も現われる。布モデルには、このような非線形性が取り入れられることが望ましい。

布形状を数値計算する場合、布を格子状に離散化し、各格子点の振舞いを表す方

程式の数値解を求める。この方程式が時間を含まない関数で表現できる場合を“静的モデル”と呼び、時間を含む場合を“動的モデル”と呼ぶ。

静的モデルでは、布を連続体と仮定し弾性体理論の枠組みでエネルギー関数を定義し、有限要素法で安定形状を算出する方法が提案されている [53, 60, 61]。また、布を相互に作用を及ぼし合う微小粒子の集合と仮定し、エネルギー関数を定義し安定形状を算出する方法も提案されている [48, 49]。この方法は、従来からの連続体モデルに対して、相互作用型粒子モデル (interactive particles model) と呼ばれている。

静的モデルでは、与えられた力と初期形状、並びに、布の特性値から唯一の衣服形状が定まると仮定している。しかし、実際の布は形状履歴のある非線形な特性をもち、本質的に多安定であり、衣服形状は布の形状変形過程に依存する。したがって、衣服形状を計算するためには、形状変形過程を全て計算しなければならないので、動的モデルが適している。動的モデルでは、形状計算だけでなく外部からの操作で衣服を人体モデルに着付たり、衣服の形を整えたりする計算も可能になる。

布の変形状況を算出できる動的モデルは、1987年に Terzopoulos らにより提案された [45, 46]。これは、時間軸に沿って布の変形を計算する“物理的アプローチ”によるものであるが、現実世界をシミュレートするためには、様々なパラメータを人間が経験に基づいて与えなければならず、生成された変形状もアニメーションのような用途のみにおいて有効であると思われる。他にもいくつかの動的モデルが提案されている [62, 63, 64, 65] が、計算に時間がかかりすぎたり、実際の非線形な布特性の取り込みができない等の理由で仮想服飾環境には適用できない。

静的モデルでは力の釣合を表す連立方程式を解くのに対し、動的モデルでは、D'Alembert の方法を用いて慣性項を含んだ連立運動方程式 (連立微分方程式) を数値積分によって解く。数値計算における布の自由度は、分割要素数 n と布のおか

を算出するためには、分割数を 10^3 程度にとる必要があり、計算に必要な剛体マトリックスは $O(n^2)$ となり 10^6 程度の大きさになる。この程度の大きさのマトリックスの計算は、現在のスーパーコンピュータを用いれば計算不可能ではないが、計算コストの観点から見て不経済的である。このような理由から、大規模な連立微分方程式を直接的に解くことが実際的に困難である。そこで、質点同士の係わり合いを定式化し、連立条件を表す制約として連立運動方程式を独立な運動方程式に変換して解くことが必要になる。この方法ならば $O(n)$ 個の方程式になる。これより、布形状の計算は、“布の制約を考慮して運動方程式を解く”ことになる。そして、布の制約条件には、“幾何学的制約”と“力学的制約”の両方を考える。これは、“幾何学的アプローチ”と“物理的アプローチ”を統合したアプローチである。

このように、制約を考慮して運動方程式を解く場合には、いかに、制約条件を運動方程式に取り込んでいくかが問題になる。従来から行われてきた方法を分類すると、

- (a) 制約条件を取り込んだ運動方程式を解く方法、
 - (b) 制約条件を満たす座標系で運動方程式を解く方法、
 - (c) 運動方程式の解を制約条件のもとで修正する方法
- の三通りに分けられる。

簡単な例題として、壁に衝突し跳ね返る質点の運動を考え、それぞれの方法を説明する。この例題では壁との衝突を制約条件としてどう表現するかが問題となる。

図 4 に示すように、質点の質量を μ 、重力加速度を g とし、質点の位置座標を \mathbf{r} とする。

- (a) 制約条件を取り込んだ運動方程式を解く方法

この方法による質点の運動方程式は、

$$\mu \ddot{\mathbf{r}} = \mu \mathbf{g} + \mathbf{F}^{\text{colli}}(\mathbf{r}) \quad (1)$$

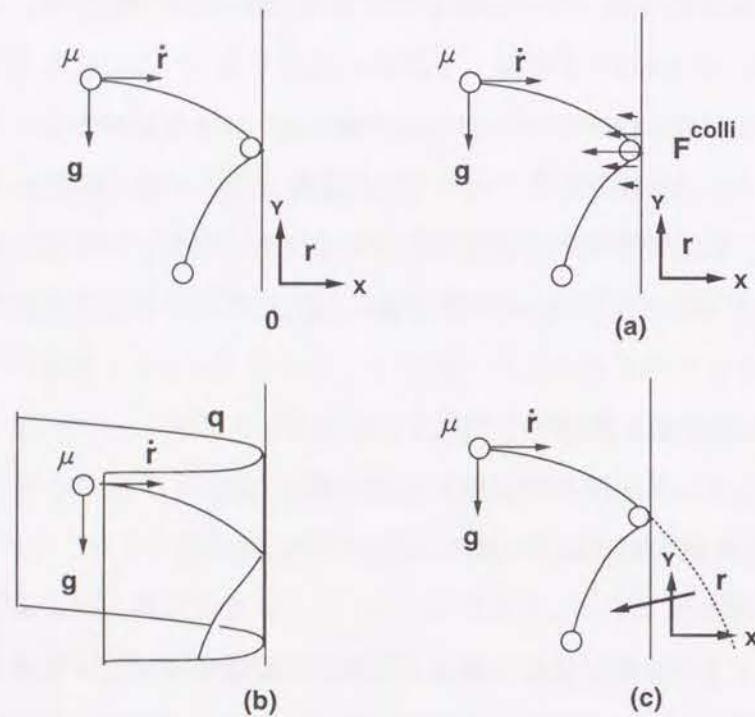


図 4: 壁に衝突する質点の運動

となる．ここで， $\mathbf{F}^{\text{colli}}(\mathbf{r})$ は衝突力とか物体力と呼ばれる仮想的な斥力であり，壁に近づく程指数的に大きくなる力が提案されている [45, 53]．質点は，力学的制約により壁から跳ね返ることになる．しかし，質点が壁と衝突する前に跳ね返ったり，壁の中に入り込んだりしないように斥力のパラメータをうまく設定する必要がある．

この方法のように，布の形状保持に関する制約をバネの力として運動方程式に組み込むのが弾性体近似である．弾性体近似には，布の弾性定数を引張り試験結果より推定しなければならないが，弾性，塑性，粘性の各特性が入り交じった試験結果から適切な弾性定数を推定するのは困難であり，また，弾性体近似が成立する範囲も極めて小さい．その上，弾性体近似による動的計算では，布形状が変化することにより局所的な伸び（または，縮み）が起こり，運動エネルギーが弾性体に蓄積されたり，放出されたりするために，物理的な弾性振動が発生する．しかし，このような振動は現実の布では見られないことから極めて不自然な印象をもたらす．

また，振動は積分条件などの数値解法によっても発生し，この場合の振動は発散しやすく計算が不安定になる．この問題はスティフネス問題と呼ばれている．スティフネス問題を避けるために，十分に小さな単位時間幅 (Δt) で制約条件を取り込んだ運動方程式を計算する必要がある．しかし，安定な計算を実現する単位時間幅が小さいと，布の変形計算に膨大な時間がかかる．数値計算の安定性と計算時間のバランスを取る場合には，実際の布特性をそのまま利用することができなくなる．

(b) 制約条件を満たす座標系で運動方程式を解く方法

この方法による質点の運動方程式は，

$$\mu \ddot{\mathbf{q}} = \mu \mathbf{g} \quad (2)$$

となる。ここで \mathbf{q} は図 4(b) に示すような壁を含まない一般化座標系でのベクトルである。この座標系では、壁は存在しないために衝突を計算する必要はない。一般化座標系で解いた運動方程式の解を全体座標系に変換すれば、壁で跳ね返る質点の運動を計算できる。

このような、一般化座標系に幾何学的制約を課して、運動系の自由度を減らす方法で布形状を計算する場合には、座標系を布の物体座標系に変換しなければならない。布の厚み方向に変位しないという制約をつけ加えた上で座標系を変換し、運動方程式を解く方法 [65] が提案されている。しかしこの方法では、伸びやせん断についての制約を座標系に課していないので運動方程式の計算時に弾性力を加える必要があり、(a) の方法と同様にスティフネス問題が起こる。また、一般的には、布の形状計算に適した一般化座標系を設定するのは難しい。

(c) 運動方程式の解を制約条件のもとで修正する方法

この方法による質点の運動方程式は、

$$\begin{aligned} \mu \ddot{\mathbf{r}} &= \mu \mathbf{g} \\ \text{if } r_x > 0 \text{ then } \dot{r}_x &= -\dot{r}_x \end{aligned} \quad (3)$$

となる。 r_x, \dot{r}_x は、質点の座標、速度の X 方向成分である。壁と衝突した場合に、壁の法線方向の速度成分の向きが逆になる。この運動方程式の解の修正は、時間軸とは独立に行われる。

この方法では、布の伸び特性を幾何学的制約として運動方程式の解を改良することになる。安居院らは仮想変位において布の伸びを最小にする方法で袖のグラフィックス表現を試みている [64]。この試みでは、腕の曲げによる袖のしわの生成を計算しているが、計算には布の力学特性が考慮されていない。

動的な布形状を計算するためには、計算が安定で、実際の力学布特性を取り込める布モデルが必要である。この方法では、“幾何学的制約”で形状を規定できるために、形状保持のための弾性力が必要なく、物理的な弾性振動が起こらず数値積分

は安定になる。また、実際の布の力学特性を制約条件として直接的に用いることができる。

制約充足型アプローチ

本論文では布のモデル化において、“力学的制約を含んだ運動方程式の解を初期値として、幾何学的制約に基づく評価関数の値を最小化するように反復修正する”方法を提案する。そして、この方法を制約充足型アプローチと呼ぶ。この方法では、“物理的アプローチ”による解を“幾何学的アプローチ”によって改良修正することになり、両者のアプローチの方法が融合することになる。

幾何学的制約に基づく評価関数の値を最小化するように反復修正する方法は、関数の最小値探索問題と深く係わっている。図 5 に示すように、初期値が評価関数の極小値 (global minimum) の近くにある場合 (図中の B, C の間) には最急降下法で極値が得られるが、初期値が極小値から離れている場合 (図中の A, D) には、局所的な最小値 (local minimum) しか得られないことになる。しかし、布は本質的に多安定であるため、評価関数も多くの停留値を持ち、それぞれの停留値が布のしわに対応していると考えられる。しわは、少しの力を加えれば新たな形状のしわに変化する。これは、局所的な最小値にあった状態が次の局所的な最小値へと移行したと考えられる。極小値は最も安定な形状であり、繰り返し定型動作で布の変形形状を見た時、最も多頻度で出現する形状に相当すると考えている。

実際の布は、その変形過程による履歴によって停留値をとると考えられるので、その振舞いを計算しようとする目的において局所的な最小値を探索すればよいと考える。

3.4 座標系と変数

本論文で用いる座標系と変数の書き方について述べる。図 6 に示すように、布の表面に沿った物体座標系を横糸方向に u 、縦糸方向に v とする。また、布を u, v 軸

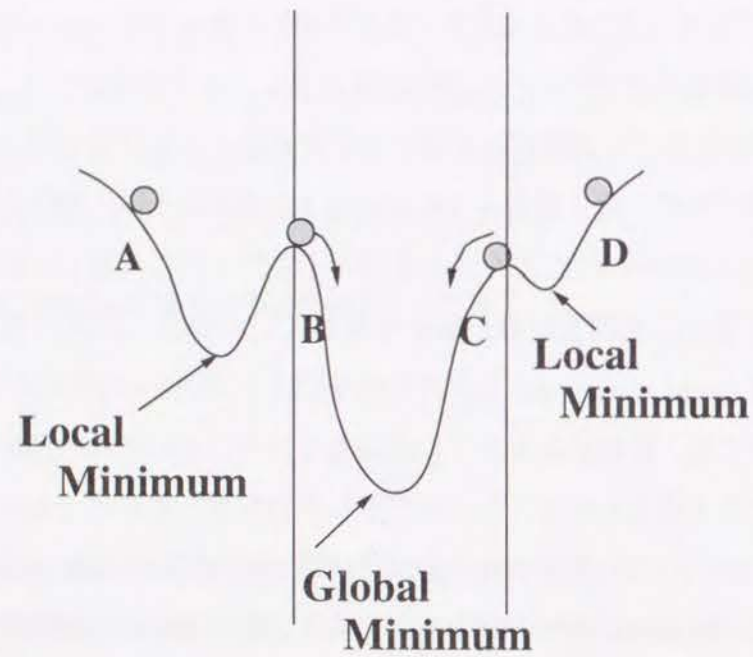


図 5: 最小値探索

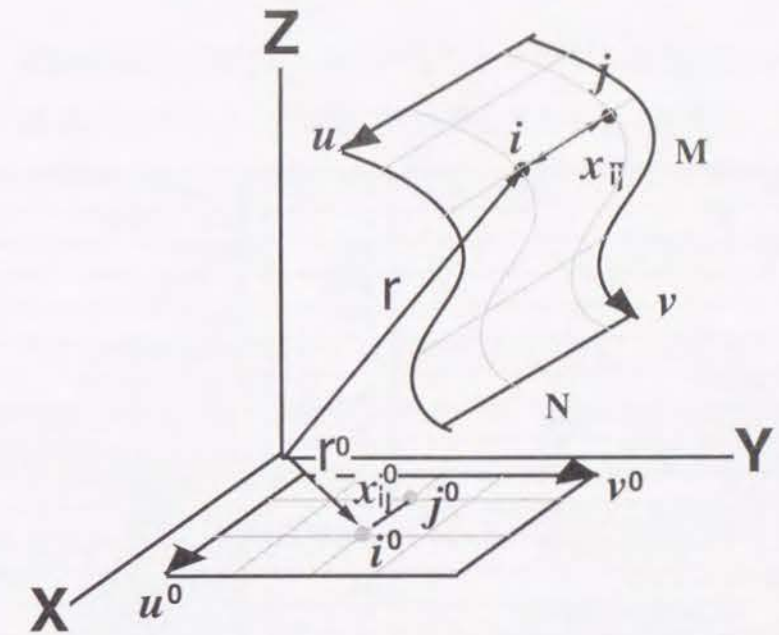


図 6: 座標系

に沿って $M \times N$ の格子に離散化し、格子中の任意の点を点 i とする。また、三次元の全体座標系の原点から点 i までのベクトルを \mathbf{r} とし、点 i に関する変数は大文字を用い Ψ_i とし、 i 点の近傍点 ($N \in \{1, \dots, 8\}$) の任意の一点 a に関する変数には、下添字を用いて \mathbf{r}_a と表す ($a \in N$)。点 i と点 j の間に関する変数は小文字で ξ_{ij} と表す。点 j が i 点の近傍であった場合には ξ_{ia} と表す。また、まぎらわしい場合を除き、添字の i は省略し \mathbf{r}, Ψ, ξ_a と表す。

u	横糸方向	v	縦糸方向
\mathbf{r}	位置ベクトル	$\dot{\mathbf{r}}$	速度ベクトル
$\ddot{\mathbf{r}}$	加速度ベクトル	\mathbf{F}^{acc}	慣性力
\mathbf{F}^{ext}	外部力	\mathbf{F}^{bnd}	曲げ回復力
\mathbf{F}^{int}	内力	\mathbf{F}^{col}	衝突力
\mathbf{F}^{fric}	摩擦力	λ	正則化パラメータ
$\bar{\epsilon}_a$	特性上の伸び率	ϵ_a	計算上の伸び率
φ_a^h	点 i と点 a の間の引張り特性	p_a	i 点と a 点間に作用する力の大きさ
l_a	点 i と点 a の間の距離	l_a^0	点 i と点 a の間の初期長
E_a^e	形状誤差関数	\mathbf{n}	点 i の法線ベクトル
\mathbf{d}_a	点 i から点 a に向かう単位方向ベクトル	Θ_a	曲がり角度
W_a	曲げモーメントが作用する幅	S	点 i が代表する面積
M	点 i の曲げモーメント	M_a	点 a の曲げモーメント
\mathcal{M}	点 i の u, v 軸方向の 4 近傍点	\mathcal{N}	点 i の 8 近傍点
η_a	点 i と点 a の法線から定まる曲率	η	点 i の曲率
φ_θ^h	θ 方向の引張り特性	ϕ_θ^h	θ 方向の曲げ特性
M_0	残留モーメント	B	履歴曲線の傾き (曲げ剛さ)
\mathbf{F}^{sum}	点 i にかかる外力の総和	\mathbf{F}^m	実効的な変形力
ϕ_a^h	点 i と点 a の間の曲げ回復特性	\mathbf{p}_a	点 i と点 a の間の軸力 (内力) ベクトル
μ	点 i の質量	c	減衰係数
Δt	単位時間間隔	γ	ステップ幅
$SD()$	標準偏差を求める関数	T_h	閾値
\mathbf{F}^T	形状の制約力	\mathbf{T}	回転方向ベクトル
E_1	滑らかさを表す関数	E_2	せん断変形を表す関数
E_3	格子間の長さの関数	c_1, c_2, c_3	重み係数
ρ	静止摩擦係数	ν	跳ね返り係数
$\bar{\mathbf{r}}$	移動平均速度	$\max()$	最大値を求める関数
c^{air}	空気抵抗	c^{fric}	布摩擦の係数
\mathbf{F}^{shp}	形状保持力	\mathbf{F}^{bdy}	幾何モデルによる衝突力
\mathbf{F}^{col}	物理モデルによる衝突力	θ_a	布面内の角度
Ze	人体モデルから得られる距離画像	Zr	三次元計測による距離画像
\mathbf{V}	空間ベクトル	E	評価関数

表 1: 変数リスト

3.5 布モデルの原理

従来から、剛体や流体、弾性体の変形や動きを計算する研究が行われている。自由度の少ない剛体に比べると、自由度の多い柔軟体の変形や動きは、その表現が難しかった。エネルギー保存の法則に基づくと、柔軟体のエネルギー (U_T) は、

$$U^T = U^{int} + U^{bnd} + U^m + U^{col} + U^X \quad (4)$$

となる。ここで、 U^{int} は内部エネルギー、 U^{bnd} は曲げ回復エネルギー、 U^{ext} は重力などの外力ポテンシャル、 U^{col} は衝突エネルギー、 U^X はその他のエネルギーであり、このエネルギーは正確には求められない。このようなエネルギーを持つ柔軟体の運動は、エネルギー最小化の原理により (5) 式で表される。

$$\frac{\partial U^T}{\partial \mathbf{r}} = \partial(U^{int} + U^{bnd} + U^{ext} + U^{col} + U^X) / \partial \mathbf{r} \quad (5)$$

ここで、 \mathbf{r} は位置ベクトルである。これは、(6) 式のように力の釣り合いでも表現することができる。

$$\mathbf{F}^{acc} = \mathbf{F}^{int} + \mathbf{F}^{bnd} + \mathbf{F}^{ext} + \mathbf{F}^{col} + \mathbf{F}^{fric} \quad (6)$$

ここで、 \mathbf{F}^{acc} は慣性力、 \mathbf{F}^{ext} は外部力、 \mathbf{F}^{bnd} は曲げ回復力、 \mathbf{F}^{int} は内力、 \mathbf{F}^{col} は衝突力、 \mathbf{F}^{fric} は摩擦力である。摩擦力は求められないので、(4)(6) 式は、 U^X, \mathbf{F}^{fric} を最小化するように計算する。さらに、式中の \mathbf{F}^{int} と \mathbf{F}^{col} は、他の力と比較して非常に大きなものになる。ゆえに、この二つの力が支配的になるために、解空間が非常に急峻な谷になり、(6) 式は非常に解きにくくなる。これが、ステイフネス問題と呼ばれる問題であり、方程式が硬くなるとも表現される。ステイフネス問題を避けるために、 \mathbf{F}^{int} と \mathbf{F}^{col} を、実質的に小さな力になるような工夫をする方向で (6) 式を解く試みがなされてきた。また、 \mathbf{F}^{int} と \mathbf{F}^{col} を制約条件とみなし、ラグランジェの未定係数法により制約力を求め、運動方程式を解く試みもなされている [50]。この場合には、未定係数を計算するのに時間がかかるという欠点がある。

本論文では、 \mathbf{F}^{int} と \mathbf{F}^{col} を制約条件とみなし、正則化理論を使った制約充足化の枠組みで、この問題を考える。正則化パラメータ(λ)を使うと(6)式は、

$$E = \sum (\|\mathbf{F}\|^2 + \|\lambda \mathbf{f}\|^2) \quad (7)$$

の形式になる。正則化理論では、 E を最小化することで運動状態を計算する。ここで、 $\|X\|$ は、 X のユークリッドノルムである。また、 \mathbf{f} は制約条件($\mathbf{F}^{int}, \mathbf{F}^{col}$)であり、 \mathbf{F} は、それ以外の力である。ここで、 λ は制約の影響の大きさを示し、 $\lambda=0$ から制約の大きさに従って、徐々に大きくなっていく係数である。これは、制約なしの緩やかな解空間での解探索が、 λ が大きくなるに連れて急峻な解空間に連続的に変化していくことを示している。ゆえに、(7)式の本質は、段階的に解空間探索の範囲を狭めることにある。要するに、徐々に近似精度を上げていることになる。

3.5.1 基本的な布モデル

実際の布は、非線形で複雑な力学特性を持っている。布の力学特性は、(1) 引張り特性、(2) 曲げ特性、(3) セン断特性、(4) 自重、が重要視される。しかし、本節では、(1) 引張り特性、(2) 曲げ特性、(3) セン断特性、を無視した基本的な布モデルを考える。布の力学特性は、次節以降で述べていく。

ユークリッド空間(x, y, z)で格子点の座標を

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}[x, y, z, t] \quad (8)$$

とすると、布の運動方程式は、

$$\mu \ddot{\mathbf{r}} + c \dot{\mathbf{r}} = \mathbf{F}^m \quad (9)$$

と表される。ここで、 μ は格子点が代表する質量、 c は空気抵抗定数、 t は時間(sec)である。 \mathbf{F}^m は布表面の法線方向の力で、変形に関与する実効的な力である。布に作用する力の総和を \mathbf{F}^{sum} 、布表面の単位法線ベクトルを \mathbf{n} とすると、実効的な外部力 \mathbf{F}^m は、

$$\mathbf{F}^m \approx (\mathbf{F}^{sum} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} \quad (10)$$

として近似できる。これは、布が伸びないと仮定しているために、布表面方向に作用する力は布の内力と釣り合って作用しないからである。さらに曲げ回復力を考慮しないので、 \mathbf{F}^{sum} は外力 \mathbf{F}^{ext} だけで近似できる。

$$\mathbf{F}^{sum} \approx \mathbf{F}^{ext} \quad (11)$$

外力 \mathbf{F}^{ext} は重力(重力ベクトル \mathbf{g})だけを考えた場合には、

$$\mathbf{F}^{ext} = \mu \mathbf{g} \quad (12)$$

である。

制約条件は,

$$E^e = \frac{1}{2} \sum_i \sum_{a \in \mathcal{N}} (l_a^t - l_a^0)^2 \quad (13)$$

で定義される関数 (E^e) を極小化することである. l_a^t , l_a^0 は, 時刻 t における i 点とその近傍の a 点との間の距離と, 初期長さである.

正則化パラメータ (λ) を導入し, 正則化問題に変換した場合には,

$$\mu \ddot{\mathbf{r}} + c \dot{\mathbf{r}} + \lambda (l_a^t - l_a^0) \mathbf{d} = \mathbf{F}^m \quad (14)$$

となる. この式の解き方として, 初期状態として制約条件が満たされている状態 (伸びが全くない状態) を想定する. このときには λ は零であるので,

$$\mu \ddot{\mathbf{r}} + c \dot{\mathbf{r}} = \mathbf{F}^m \quad (15)$$

になる. この式は前進差分スキームを用いると一意に解ける.

$$\ddot{\mathbf{r}} = \frac{\dot{\mathbf{r}}^{t+1} - \dot{\mathbf{r}}^t}{\Delta t} = \frac{\mathbf{r}^{t+1} + \mathbf{r}^{t-1} - 2\mathbf{r}^t}{\Delta t^2} \quad (16)$$

$$\dot{\mathbf{r}} = \frac{\mathbf{r}^{t+1} - \mathbf{r}^t}{\Delta t} \quad (17)$$

(16)(17) 式を (15) 式に代入すると,

$$\dot{\mathbf{r}}^{t+1} = \frac{1}{\mu + c\Delta t} (\mu \dot{\mathbf{r}}^t + \mathbf{F}^m \Delta t) \quad (18)$$

が得られる. 位置ベクトルは, 影響が微小な二次以上の項を無視すると,

$$\mathbf{r}^{t+1} \approx \mathbf{r}^t + \dot{\mathbf{r}}^{t+1} \Delta t \quad (19)$$

と近似できる. しかし実際に, この運動が起こると微小時間幅 (Δt) 内で伸びが発生する. そこで, 運動によって引き起こされる伸びがなくなるように $\dot{\mathbf{r}}^{t+1}$ を修正する必要がある. (18) 式の $\dot{\mathbf{r}}^{t+1}$ を初期値として, m 回の修正が行われたベクトルを $\dot{\mathbf{r}}^{(m)}$ で記述する. また, $\mathbf{r}^{(m+1)} = \mathbf{r}^{t+1} + \dot{\mathbf{r}}^{(m)} \Delta t$ である. 修正量と修正方向を示すベクトルは,

$$\mathbf{R}^{(m)} = \sum_{a \in \mathcal{N}} (l_a^{(m)} - l_a^0) \mathbf{d}_a^{(m)} \quad (20)$$

と書ける. ここで, $l_a^{(m)}$ は m 回の修正時における i 点とその近傍の a 点との距離であり, $\mathbf{d}_a^{(m)}$ は i 点から a 点へ向かう単位方向ベクトルである.

$$l_a^{(m)} = |\mathbf{r}_a^{(m)} - \mathbf{r}_i^{(m)}| \quad (21)$$

$$\mathbf{d}_a^{(m)} = (\mathbf{r}_a^{(m)} - \mathbf{r}_i^{(m)}) / l_a^{(m)} \quad (22)$$

また速度ベクトルの修正は,

$$\dot{\mathbf{r}}^{(m+1)} = \dot{\mathbf{r}}^{(m)} - \gamma \mathbf{R}^{(m)} / \Delta t \quad (23)$$

となる. この修正を, $l_a^{(m)} = l_a^0$ になるまで繰り返す. 実際には, $SD(l_a^{(m)} - l_a^0) < T_h$ になった時に収束したと判定する. $SD()$ は標準偏差を計算する関数であり, T_h は閾値である. この修正がなされた後の運動は,

$$\mu \ddot{\mathbf{r}} + c \dot{\mathbf{r}} + \mathbf{F}^{\text{con}} = \mathbf{F}^m \quad (24)$$

と書ける. ここで, \mathbf{F}^{con} は制約力 (伸びに対する抵抗力) に相当する. 注意しなければならないことは \mathbf{F}^{con} が制約力であり, 伸びの回復力ではないことである. 伸びの回復力は, 本質的にバネの力であり振動を伴う. 制約力は幾何学的な制約条件を力で表現したもので, 振動をも制御する力である.

実際の布では, 伸び特性やせん断特性, 曲げ特性, 異方性, 履歴を考慮しなければならない. この場合には, 制約関数が内力をパラメータとするので内力計算が必要になる.

3.6 布の力学特性の測定と定式化

制約条件として、布の物理特性を利用する。布の物理特性を測定する一つの手法として、繊維業界では KES(Kawabata's Evaluation System for fabric) 法が広く用いられている [66]。布の物理特性として、(1) 引張り特性、(2) 曲げ特性、が重要である。KES 法による測定値を制約条件とするために、図 6 に示す座標系を用いて KES 法の測定内容を定式化する。

3.6.1 引張り試験

引張り試験は、幅 20cm 縦 5cm の長方形の布を用いて、 $4.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ のゆっくりとしたひずみ速度で最大荷重 500gf/cm まで引張ってから、変形回復過程に移り、その伸び率を測定する。測定は、縦糸方向 (v^0) と横糸方向 (u^0) で行なう (図 6 参照)。布中の i 点とその近傍の a 点間に作用する力の大きさを p_a とすると、この測定は定常状態の引張り特性として (25) 式で表現できる。

$$\bar{\epsilon}_a = \varphi_a^h(p_a) \quad (25)$$

ここで、 $\bar{\epsilon}_a$ は特性上の伸び率であり、 φ_a^h は引張り特性、上添字 h は引張り特性が履歴に従うヒステリシスな関数であることを示している。

布形状の数値計算においては、計算上の伸び率と特性上の伸び率が一致しなければならない。計算上の伸び率 ϵ_a は、

$$\epsilon_a = (l_a - l_a^0) / l_a^0 \quad (26)$$

である。ここで、 l_a, l_a^0 は点 i と点 a の間の距離とその初期長である。ゆえに、 $\epsilon_a = \bar{\epsilon}_a$ が制約条件となる。実際の計算では、計算上の伸び率と特性上の伸び率の自乗誤差が十分小さくなるようにする。形状誤差関数 E_a^e は、

$$E_a^e = \frac{1}{2} (l_a^0 (\epsilon_a - \bar{\epsilon}_a))^2 \quad (27)$$

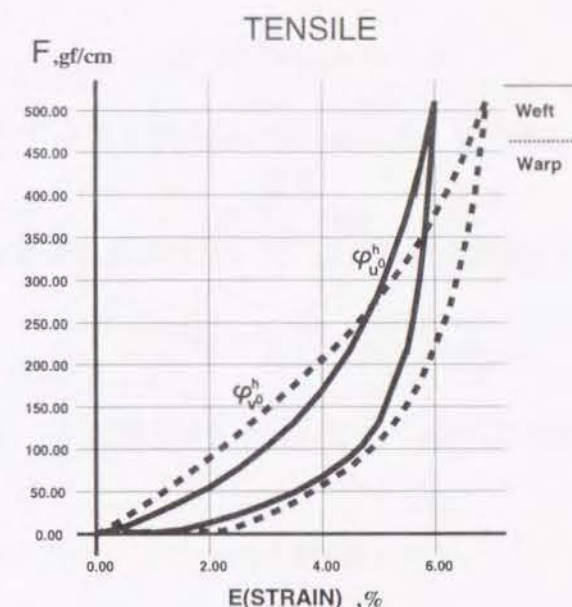


図 7: 引張り特性

となる。

図 7 に布が綿の場合の引張り試験の結果の一例を示す。ここで注意しなければならないのは、引張り試験結果から、加えられた力による伸び率を得ることはできるが、履歴があるために、伸び率から布の伸び回復力 (弾性力) を得ることはできないことである。これは、測定の原理が布の伸び抵抗を測定していることから明らかである。従ってこの測定結果は、運動方程式に直接利用することはできず、運動方程式の解を修正するための幾何学的制約としてのみ直接利用できる。

3.6.2 曲げ試験

曲げ試験は、長さ 2.5cm 幅 1cm の布の両端を把持し $\pm 2.5 \text{cm}^{-1}$ の曲率を与え、固定端での回転モーメントを測定する。つまり、ある曲率で曲がった布が発生する回復力を測定しているので、図 8 に示すように、曲がり角度 (θ_a) を求め、次いで曲率 (η_a) を求める。

$$\Theta_a = \pi - \cos^{-1}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{d}_a) \quad (28)$$

\cdot は内積, \mathbf{n} は点 i の法線ベクトル, \mathbf{d}_a は点 i から点 a に向かう単位方向ベクトルである.

点 i と点 a の法線から定まる曲率を η_a , 点 i と点 a 間の距離を l_a とすると,

$$\eta_a = (\cos \Theta_a + 1 / \tan \Theta_a) / l_a \quad (29)$$

になる. また, W_a を曲げモーメントが作用する幅とすると, 点 i が代表する面積 S と l_a から

$$W_a \approx S / l_a \quad (30)$$

で近似できる. 点 i の曲げモーメント (M) は,

$$M = \frac{1}{2} \sum_{a \in \mathcal{M}} W_a \phi_a^h(\eta_a) \quad (31)$$

になる. ここで, ϕ_a^h は曲げ回復特性であり, 上添字 h は曲げ回復特性が履歴に従うヒステリシスな関数であることを示す. 総和の範囲 \mathcal{M} は, u, v 軸方向の 4 近傍点 (図 8 では点 1, 2, 3, 4 が点 i の近傍点) である.

さらに, 曲げモーメントは, 布の面に垂直な方向 (法線方向) のせん断力として作用するので,

$$\mathbf{F}^{bnd} = \mathbf{n} \sum_{a \in \mathcal{M}} (M_a - M) / l_a \quad (32)$$

と書ける.

図 9 に曲げ試験結果の一例を示す. 曲げ試験結果から, 布形状 (曲率) に関する曲げ回復力を得ることができる. しかし, 加えられた力から曲率を計算することはできないので, これは幾何学的制約にはならない. 曲げ特性は, 力学的制約である曲げ回復力として運動方程式に取り入れる.

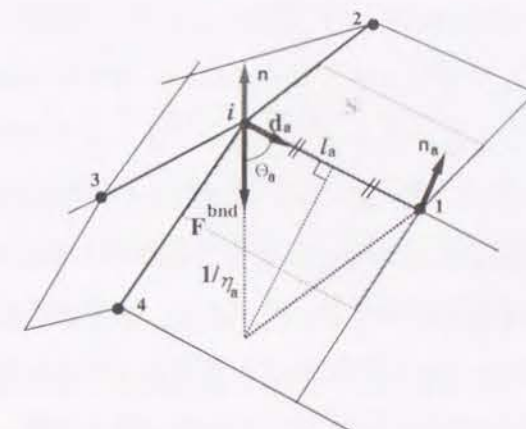


図 8: 曲げ回復力

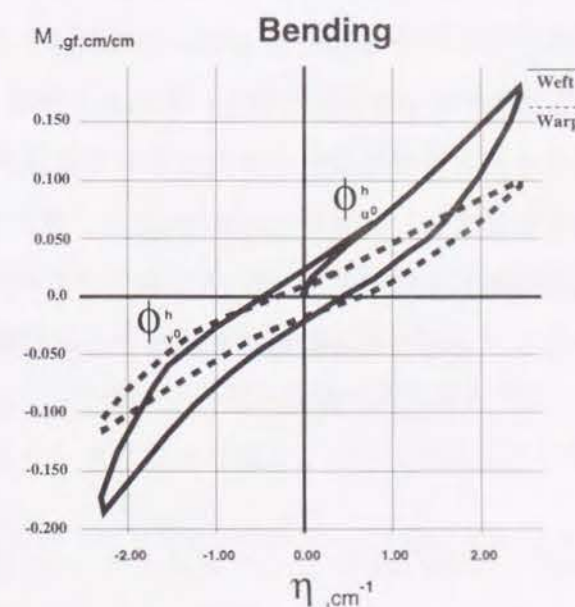


図 9: 曲げ回復特性

3.7 KES 法の拡張と測定値の補間計算

KES 法はもともと、布の風合いを定量化する目的で開発されたものであるため、必ずしも数値計算に適した測定方法とはいえない。布形状の数値計算に利用するために、考慮しなければならないことが二つある。第一は布の異方性である。数値計算で異方性を考慮するためには、あらゆる方向の布の特性値が必要である。しかし、KES 法では、横糸、縦糸方向の特性しか測定されない。そこで、最小の測定項目を追加して、全方向の特性値を計算する必要がある。第二は履歴である。KES 法では測定の手返し点、引張り特性では引張り力 500gf、曲特性では曲率 $\pm 2.5(\text{cm}^{-1})$ となっているために、それ以外の手返し点からの履歴曲線は計算で求めなければならない。

3.7.1 異方性の計算

一般的に、布の力学特性には異方性がある。KES 法で測定している、せん断特性はバイアス方向の引張り特性と等価であるために、引張り特性の異方性を計算すれば、せん断特性を測定する必要はなくなる。布の異方性は、布固有のくせの表現にもつながると考えられる重要な布力学特性の一つである。異方性については、直交異方性板理論が当てはまるといわれている [67][68]。直交異方性板理論による異方性の式を、非線型関数に拡張すると (33)(35) 式になる。この式に実際の布特性の実測値を代入すると、布特性の非線型性や履歴までも補間計算できる。

任意角度の引張り特性

$$\varphi_{\theta}^h(f) = \{\cos^4\theta/\varphi_v^h(f) + G' \sin^2\theta \cos^2\theta + \sin^4\theta/\varphi_u^h(f)\}^{-1} \quad (33)$$

$$G' = 4/E_{\frac{\pi}{4}}^h(f) - 1/\varphi_v^h(f) - 1/\varphi_u^h(f) \quad (34)$$

ここで、 $\varphi_v^h(f)$ 、 $\varphi_u^h(f)$ 、 $\varphi_{\frac{\pi}{4}}^h(f)$ は、それぞれ、縦糸方向、横糸方向、バイアス (45 度) 方向の引張り特性である。 θ は異方性の角度、 f は引張り力、 h は履歴を示す。

任意角度の曲げ特性

$$\phi_{\theta}^h(f) = \{\cos^4\theta/\phi_v^h(\eta) + N' \sin^2\theta \cos^2\theta + \sin^4\theta/\phi_u^h(\eta)\}^{-1} \quad (35)$$

$$N' = 4/\phi_{\frac{\pi}{4}}^h(\eta) - 1/\phi_v^h(\eta) - 1/\phi_u^h(\eta) \quad (36)$$

ここで、 $\phi_v^h(\eta)$ 、 $\phi_u^h(\eta)$ 、 $\phi_{\frac{\pi}{4}}^h(\eta)$ は、それぞれ、縦糸方向、横糸方向、バイアス (45 度) 方向の曲げ特性である。 θ は異方性の角度、 η は曲率、 h は履歴を示す。

これより、横糸、縦糸の他に、バイアス方向の特性が得られれば異方性が計算で得られることが分かる。しかし、実際には布の特性は、45 度方向と 135 度方向で異なる。そのために、縦糸方向、横糸方向と 45 度の測定値から、0 度から 90 度までと 180 度から 270 度までの特性を計算し、縦糸方向、横糸方向と 135 度の測定値から、90 度から 180 度までと 270 度から 360 度までの特性を計算する必要がある。

3.7.2 履歴の計算

KES 法により得られる測定結果は、引張り、曲げ特性共に履歴曲線になる。しかし、測定からは、手返し点からの履歴曲線しか得られない。シミュレーションで利用するには、任意の手返し点からの履歴を算出する必要がある。履歴曲線は、布の内部摩擦に関係すると考えられている。しかしながら、内部摩擦と履歴曲線の関係は十分に解明されておらず、従って履歴曲線の補間計算については適切な理論体系はない。履歴の計算方法は経験的に定式化していく。

引張り特性と、曲げ特性の履歴の発生機構は異なるを考える。そこで、履歴の計算方法も、引張り特性と曲げ特性の場合に分けて考えることにする。

引張り特性の履歴計算方法 最大引張り力を 100gf、200gf、300gf として KES 法 [66] による引張り測定を行い、カーブを重ね合わせると、100gf、200gf 荷重のループは、300gf 荷重のループの原点を固定して横軸方向に縮小するとほとんど一致するように見える。

図10に示すように、引張り力の方向(ϵ_t, f_t)の時点で反転するとし、その時のメジャーループの反対側のループの点を(ϵ_r, f_t)とすると、補間によるマイナーループは、メジャーループの ϵ_r が ϵ_t に重なるまで、ループの原点、または、ループの頂点を固定して縮小すればよい。

実測の引張り特性値から得られるメジャーループを表す関数を $E^h(f)$ とする。 ϵ は伸び率、 f は引張り力、 h はループの上側($h=1$)にあるか下側($h=-1$)にあるかを示す。この関数を用いると、伸び率 ϵ は、

$$\epsilon = \varphi^h(f) \quad (37)$$

で表せる。また、関数 $\varphi^h(f)$ の逆関数を $\Xi^h(\epsilon)$ とする。今 ϵ_t で極性が反転したとすると、

$$f_t = \Xi^h(\epsilon_t) \quad (38)$$

である。このときの、参照点(ϵ_r)は、

$$\epsilon_r = \varphi^{-h}(f_t) \quad (39)$$

となる。引張り力が、上昇から下降に転じた場合には、ループの原点を ϵ_m とし、また、引張り力が、下降から上昇に転じた場合には、ループの頂点を ϵ_m とする。

マイナーループの関数を $\varphi_m^h(f)$ は、

$$\varphi_m^h(f) = (\varphi^h(f) - \epsilon_r)(\epsilon_m - \epsilon_t)/(\epsilon_m - \epsilon_r) + \epsilon_t \quad (40)$$

になる。

曲げ特性の履歴計算方法 曲げ特性の履歴は、実際のところ非常に複雑である。曲げ特性が、図12(a)に示すような単純な紡錘型曲線の時には、任意の折り返し点で相似の履歴曲線を描くように見える。しかしこれは、図12(b)に示すようなスリップ型の特性の場合にはあてはまらない。また、折り返しの履歴曲線とは別に、初期

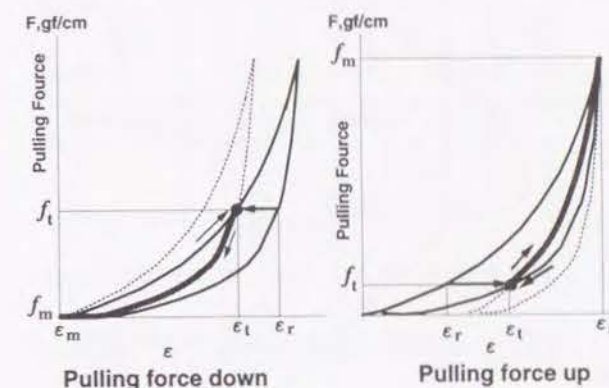


図 10: 引張り特性の履歴補間方法

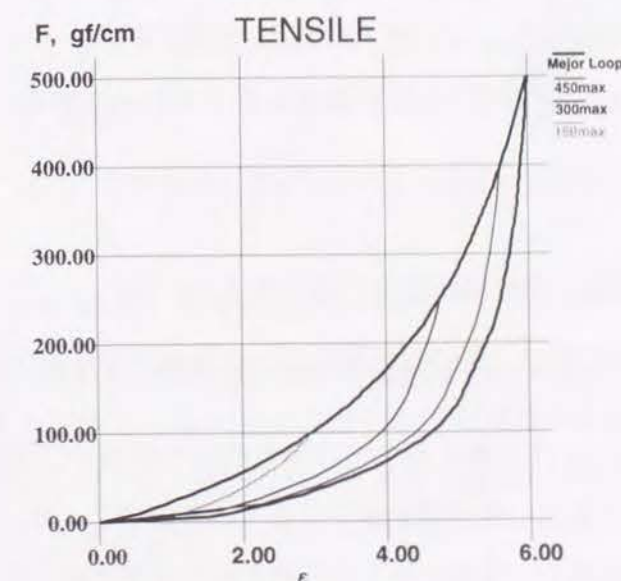


図 11: 引張り特性の履歴補間計算例

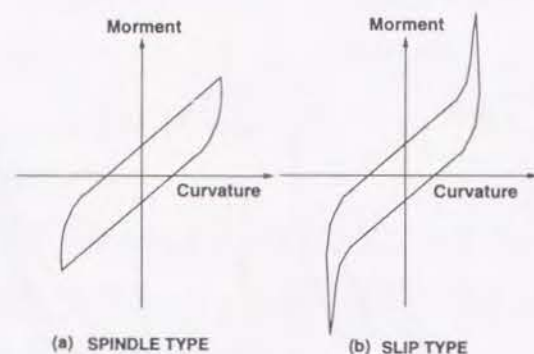


図 12: 紡錘型とスリップ型の曲げ特性

曲線も考える必要がある。初期曲線については、経験的ではあるが(41)式がよく一致するといわれている。

$$M = \sqrt{4\eta M_0 B} \quad (41)$$

ここで、 η は曲率であり、 M_0 は残留モーメント、 B は履歴曲線の傾き(曲げ剛さ)である。(41)式は $-4 M_0/B < \eta < 4 M_0/B$ の範囲で成立する。

そこで、次の仮定の基に曲げ特性の履歴を考えることにする。

曲げ特性の仮定

- (I). 曲げ特性曲線は、全て紡錘型で近似できる。
- (II). 任意折り返し点からの履歴曲線の形は初期曲線とよく似た形になる。

仮定1により、KES法で得られる曲げ特性曲線から最小二乗法により曲げ剛性と残留モーメントを算出し曲げ測定値を近似する。仮定2より、初期曲線を近似する関数をアフィン変換し、任意の折り返し点からの履歴曲線とする。任意の折り返し点からの履歴曲線を、

$$M = M_t + \sqrt{8(\eta - \eta_t) M_0 B} \quad (42)$$

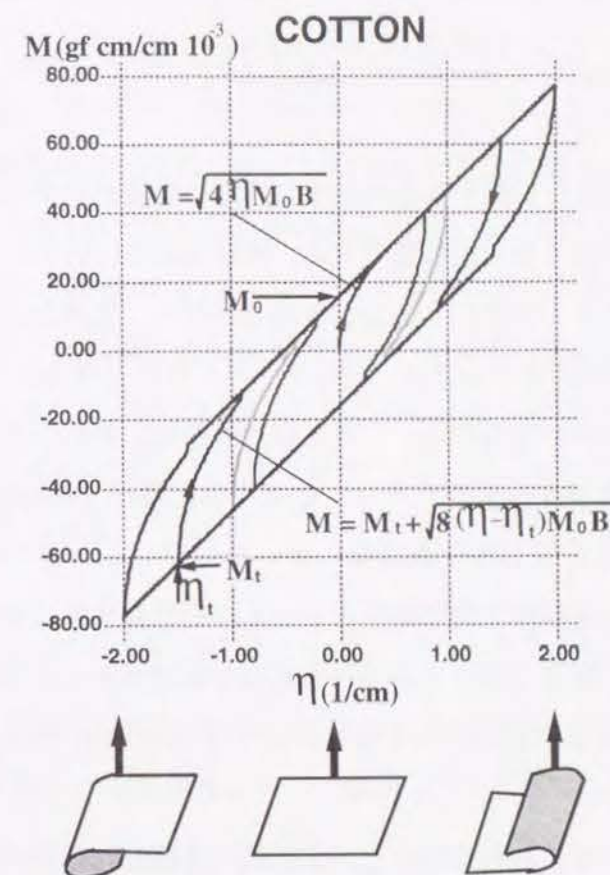


図 13: 曲げ特性の履歴補間方法と履歴補間計算例

とする。ここで、 η_t と M_t は、折り返し点の曲率とモーメントである。図13に、曲げ特性の履歴補間方法と実際の履歴補間計算例を示す。この計算式で得られる結果は、実際の測定値と比較しても大きくは変わらないが理論的な根拠がない。今回は、このような経験式を使うが、履歴に関して今後も詳細な検討を行い、理論的な数学モデルを構築する必要がある。

3.8 布の変形モデル

布の力学特性が定式化できたので、これらを使って3.5.1節で述べた基本的な布モデルを拡張していく。

まず、布の伸び変形を計算するために布の内力の計算が必要である。布の安定形状は、外力と内力の釣り合った状態である。変形過程は、外力と内力とが釣り合いきれないために生じる力の差によって引き起こされる。この力の差が実効的な変形力(\mathbf{F}^m)である。弾性体モデルでは、剛性マトリックスと外力から伸びが計算され、さらに伸びから内力が計算される。これとは対照的に、制約充足型モデルでは、まず内力の大きさを計算する必要がある。なぜなら、伸びで形状を束縛するために、どの程度伸びるかを計算しなければならないからである。どの程度伸びるかは、どの程度引き伸ばす力が発生しているかを計算すればよい。どの程度伸びるかが内力によって定まるわけである。基本的な布モデルのように伸びを無視する場合には、内力の大きさに関わらず形状が定まるので(10)式のように、内力の計算をする必要はない。

布の内力には、引張り方向の内力と、布表面の法線方向の曲げ回復力との二つの成分があるが、曲げ回復力は布形状に関係して外部力と等価に作用する力と考え、内力の引張り方向の成分だけを考える。

3.8.1 内力の計算

格子間の力 \mathbf{p}_a は点 i と点 a の間の軸力(内力)である。今、点 i にかかる外力の総和を \mathbf{F}^{sum} とすると、外部からの力と内力からなる実効的な変形力 \mathbf{F}^m は、

$$\mathbf{F}^m = \sum_{a \in \mathcal{N}} \mathbf{p}_a + \mathbf{F}^{sum} \quad (43)$$

となる。 \mathcal{N} は近傍点を示す。また、曲げ回復力 \mathbf{F}^{bnd} が外力と等価に作用すると考え、点 i にかかる外力を \mathbf{F}^{ext} とすると、

$$\mathbf{F}^{sum} = \mathbf{F}^{bnd} + \mathbf{F}^{ext} \quad (44)$$

である。図14にこの関係を示す。 \mathbf{p}_a は、スカラー成分 p_a と単位方向ベクトル \mathbf{d}_a の積である。 \mathbf{d}_a は格子点の配置で決まるが、 p_a の値は未知である。しかし、布の厚みは無視できる程度に薄いので、布の面に平行な方向に力が加えられても、実際には布が面方向に圧縮されることはなく、しわになるので計算上は $p_a \geq 0$ とする。格子は MN 個あるので(43)式は MN 個の連立式となる。 $\mathbf{F}^{ext}, \mathbf{F}^{bnd}, \mathbf{d}_a$ は既知であるが、 p_a と \mathbf{F}^m はそれぞれ $2(M-1)(N-1)$, $3MN$ 個の未知変数となる。そのために、この連立方程式を一意に解くことはできない。そこで、最小化の原理を利用する。

布が自ら進んで変形するのではなく、外部力によって仕方なく変形するのであるから、静止状態では(43)式右辺は零となる。ゆえに、(45)式の関数は常に最小になっていると考えられる。

$$E^c = \frac{1}{2} \sum (\mathbf{F}^m)^2 = \frac{1}{2} \sum (\mathbf{F}^{sum} + \sum_{a \in \mathcal{N}} p_a \mathbf{d}_a)^2 \quad (45)$$

E^c を最小化するには、 $\partial E^c / \partial p_a = 0$ になる p_a を最急降下法により求めればよい。今、 i 点とその近傍点の実効的な変形力の差を \mathbf{F}_i^d とする。

$$\mathbf{F}_i^d = \mathbf{F}_a^m - \mathbf{F}_i^m \quad (46)$$

とすると、最急降下法は(47)式のスキームで記述できる。

$$p_a^{(m+1)} = p_a^{(m)} - \gamma (\mathbf{F}_a^d \cdot \mathbf{d}_a) \quad (47)$$

(47)式では全ての i に対して、 E^c の変化が閾値 ϵ^c 以下となるまで繰り返す。ここで、 $p_a^{(m+1)}$ は更新後の $p_a^{(m)}$ を示し、 γ は更新のステップ幅である。この値を(43)式に代入すると更新された \mathbf{F}^m が求まる。

3.8.2 布の運動方程式

布の運動方程式は、

$$\mu \ddot{\mathbf{r}} + c \dot{\mathbf{r}} = \mathbf{F}^m \quad (48)$$

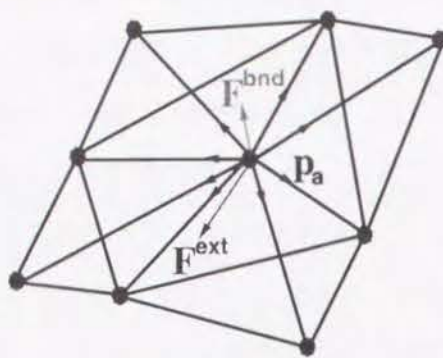


図 14: 内力の関係

になる。ここで、 μ は質量を表し、 c は空気抵抗と布の内部摩擦からなる減衰係数を表す。 \mathbf{F}^m は(43)式から分かるように、外部からの力曲げ回復力、内力からなる実効的な変形力である。この運動方程式は \mathbf{F}^m が既知のとき、単純な Euler 法のような積分法で解くことができる。その解 $\dot{\mathbf{r}}$ を初期推定値 $\dot{\mathbf{r}}^{(0)}$ として、KES の引張り特性の制約を満たすように解の修正を行う。初期推定値 $\dot{\mathbf{r}}^{(0)}$ を m 回修正したことを $\dot{\mathbf{r}}^{(m)}$ で表す。また、 $\mathbf{r}^{(m)} = \mathbf{r}^t + \dot{\mathbf{r}}^{(m)}\Delta t$ を用いて算出した変数については (m) の上添字をつける。制約条件は(27)式に修正回数 (m) を導入して、(49)式のように書ける。

$$E^e = \frac{1}{2} \sum_{a \in \mathcal{N}} \sum_{\Omega} (l_a^0(\epsilon_a^{(m)} - \bar{\epsilon}_a))^2 \quad (49)$$

\sum_{Ω} は全体格子点での総和を意味する。制約条件が成り立つときには関数 E は最小になる。 E を最小化する方向 (\mathbf{R}_a) は、

$$\mathbf{R}_a^{(m)} = \sum_{a \in \mathcal{N}} l_a^0(\epsilon_a^{(m)} - \bar{\epsilon}_a) \mathbf{d}_a^{(m)} \quad (50)$$

である。(50)式で(48)式から得られる $\dot{\mathbf{r}}$ を修正すれば制約条件は満足し、最も制約条件を満たすように運動方程式の解を修正することができる。 $\dot{\mathbf{r}}$ の修正は、

$$\dot{\mathbf{r}}^{(m+1)} = \dot{\mathbf{r}}^{(m)} - \gamma \mathbf{R}_a^{(m)} / \Delta t \quad (51)$$

の繰り返し計算で行う。ここで γ は繰り返し計算におけるステップ幅である。小さな値の γ を使い、反復計算を行うことで、滑らかな布形状を計算できる。

そして、 $SD(\mathbf{R}_a^{(m)}) < \epsilon^e$ のときに、 $\dot{\mathbf{r}}^{(m+1)}$ は許容解と見なせる。 $SD(\mathbf{R}_a^{(m)})$ は全領域における $\mathbf{R}_a^{(m)}$ の標準偏差であり、 ϵ^e は適当な閾値である。

制約が充足された時の解は、

$$\mu \ddot{\mathbf{r}} + c \dot{\mathbf{r}} + \mathbf{F}^T = \mathbf{F}^m \quad (52)$$

の解と一致する。ここで、 \mathbf{F}^T は形状の制約力である。制約を充足することで、未知の制約力を算出することになる。

図 15 に本手法の流れを示す。図 15 で示すように内力計算と速度修正の二つの部分で繰り返し収束演算が必要になる。この繰り返し収束演算が計算速度を律する制限条件となるが、実用的には、布が変形している途中の状態においては収束判定の閾値を多少大きめに設定しても、ただちに重大な不都合が起こるということはない。閾値を大きめに設定すれば形状精度は低下するが、収束演算のための繰り返し回数は減り高速な計算ができるようになる。布の変形が安定してきた頃に閾値を再設定し、形状精度を高めればよい。これは、実用的な時間で計算を進める上での工夫ともいえ、このようなことができるのも本計算手法の特長である。

3.9 計算実験

3.9.1 異方性計算と実測値の比較

図 16 に異方性計算結果と実測値とを合わせて示す。三角の上頂点部が測定値であり、11.25 度刻みで実測した。この実測値の中で、0, 45, 90 度の時の実測値（図中では白三角で表示）を(33)(35)式に代入して計算した補間結果が破線で示している。引張り特性では、引張り力をパラメータにし、曲げ特性では曲率をパラメー

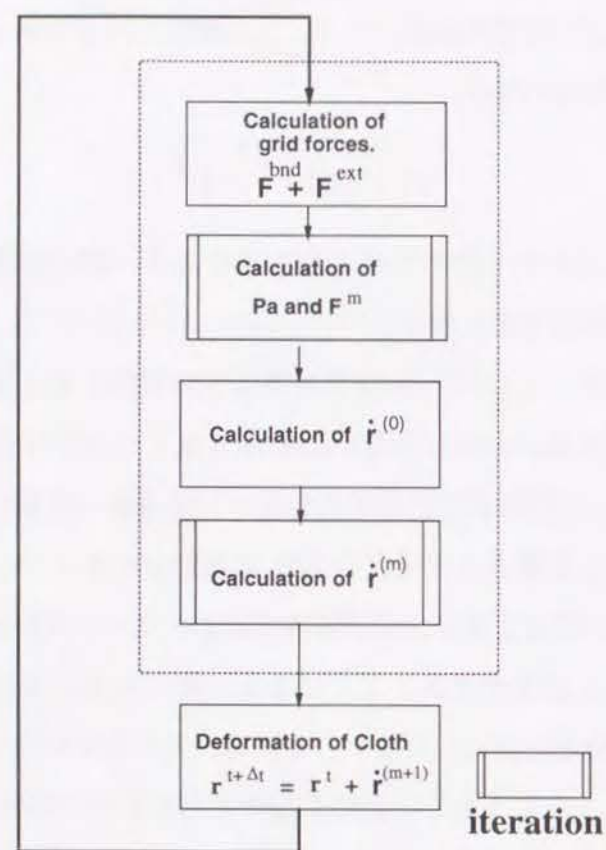


図 15: 計算の手順

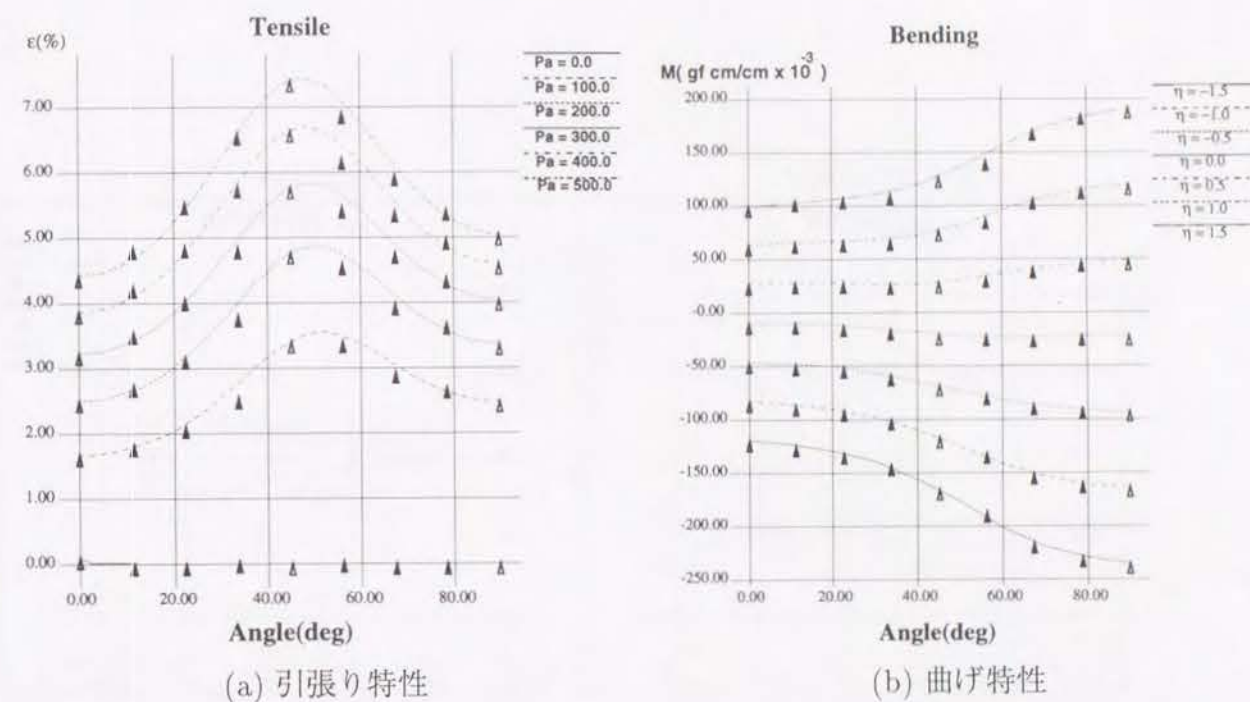


図 16: 異方性計算と実測値の比較

タにしている。図から分かるように、引張り特性、曲げ特性、共に補間結果は実測値と良い一致を示している。

次に、実際の布と計算結果との比較を行った。比較に用いた実布は、綿、ポリエステル、羊毛の3種類である。図17に3種類の布の引張り異方性計算結果を、図18に曲げ異方性計算結果を示す。この計算には、45度方向の他に135度方向の特性値も用いている。異方性は、布によって大きく異なるユニークな特性であることが分る。

3.9.2 実際の布の異方性補間計算

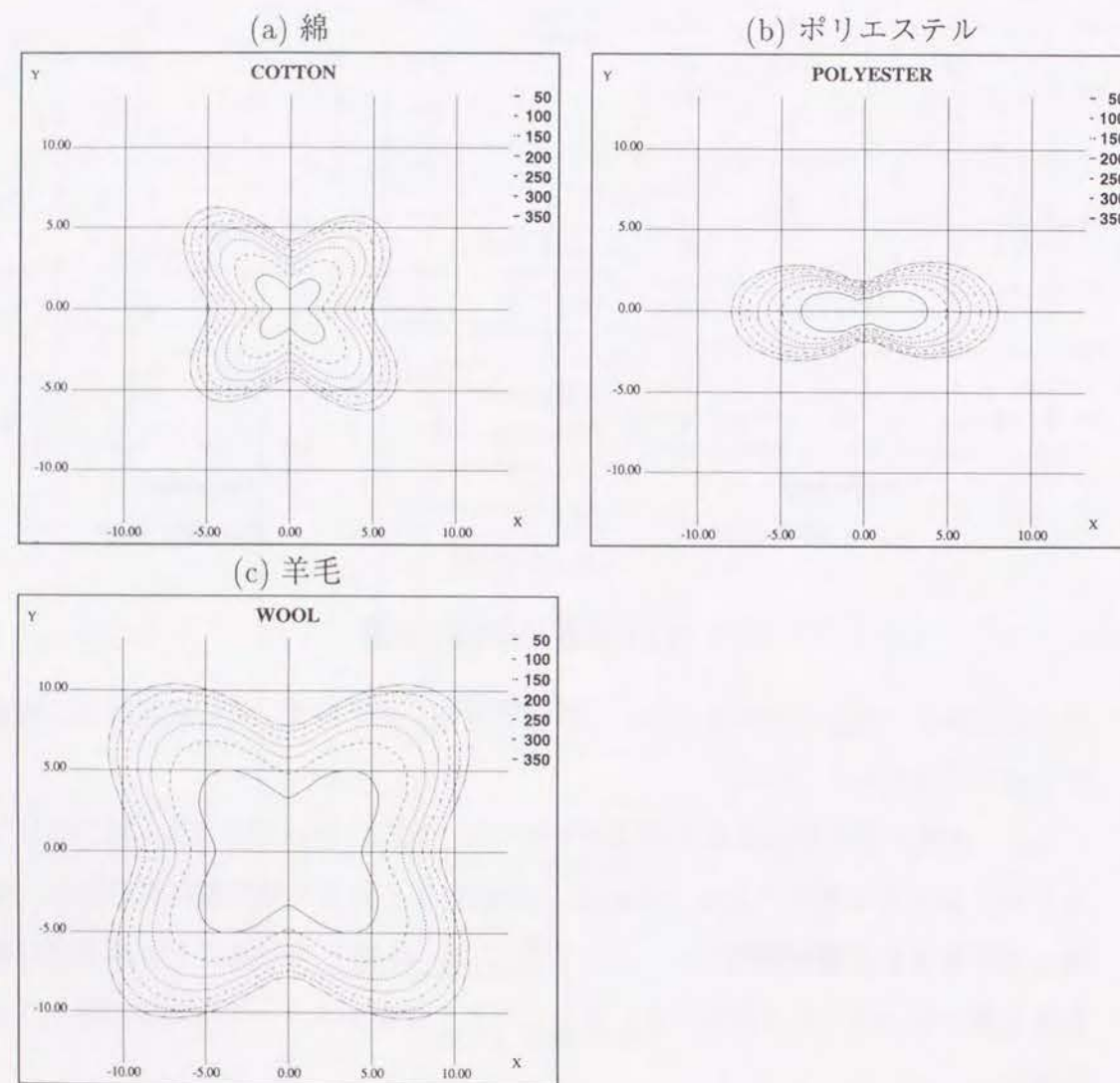


図 17: 実際の布の引張り異方性補間計算例

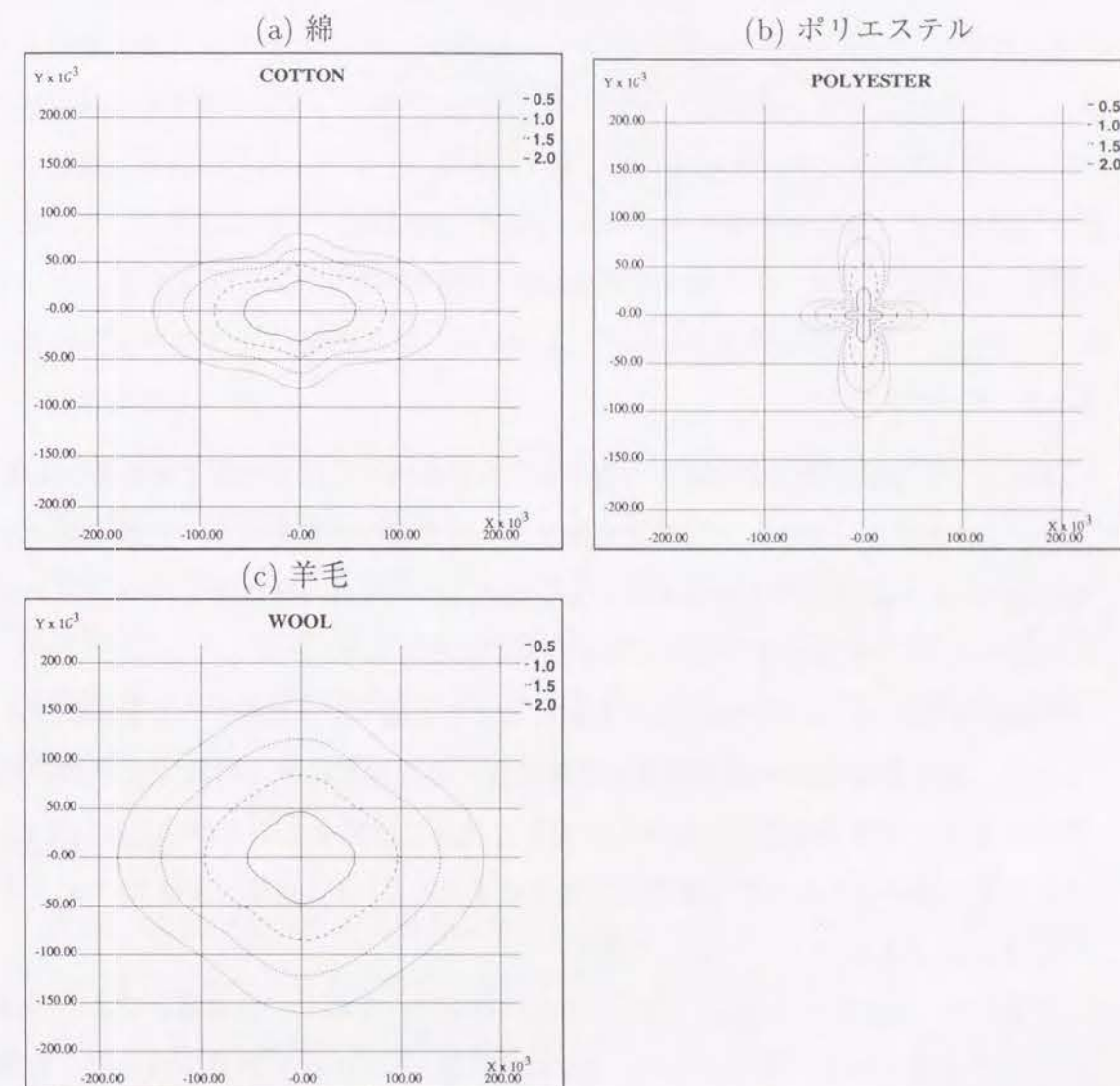


図 18: 実際の布の曲げ異方性補間計算例

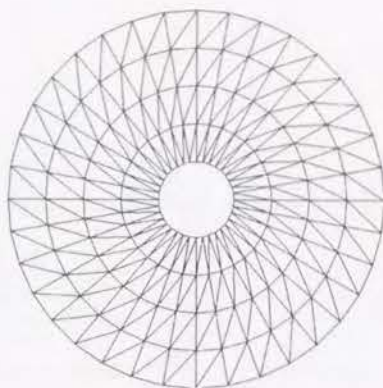


図 19: 初期形状と分割格子

3.9.3 ドレープテスト

布のような柔軟な物質の形状を評価するには、評価の状況を設定する必要がある。JIS のドレープテストに準じた状況について数値計算をする。計算に用いた布は直径 63.5cm であり、布を固定するために 12.7cm の内径に穴を持つドーナツ形状とした。図 19 に格子分割を行った初期形状を示す。

実際のドレープテストで用いられる布の形状とは違うが、このような形状にすることで、布と固定台との衝突計算が省略でき、布の内径にある計算点を空間的に固定することで布を固定台に載せた状況を近似的に計算することができる。また、この計算実験ではドレープを顕著に出現させるために、JIS 規格（直径 25.4cm）よりも大きめ（直径 63.5cm）にしてある。

計算には、SGI 社の Indigo2 (CPU: R4000-100MHz) を用い、自由落下により形状が安定するまでの 2 秒間について、単位時間間隔 $\Delta t = 0.01$ で計算を行った。計算に要した時間は約 5 分程度であった。

3.9.4 実際の布との比較

布形状は、不定的であり布の材質のみからドレープの形状が決定するわけではない。実際、綿布では、6, 7, 8 個のドレープが現れる。綿布ではドレープ・テストを何度か繰り返すうちに、8 個のドレープの出現回数が多くなる。ここでは、数回のドレープテストを行い、多く現れたドレープを代表的なドレープ形状とした。その結果、綿と羊毛が 8 ドレープであり、最も軟らかいポリエステルが 9 ドレープであった。この実験では、実際の布で発生するドレープの数を考慮して、要素分割数を 60×5 とした。実際の布の写真と計算結果をレイトレーシング [69] した結果を図 20 に示す。計算結果のドレープの数は、実際の布の代表的なドレープの数と同じであった。

また、図 21 には、綿布の自由落下によるドレープの形成過程を示す。ドレープが布の変形過程で発生し、成長していくことがわかる。

図 22、図 23 には、JIS 規格と同じ大きさの布を用いた場合のドレープテストの初期形状とドレープ形状を示す。この場合、格子が密になっているために、単位時間間隔 $\Delta t = 0.002$ で計算を行った。布の形が変わっても、正しい計算ができていることが分かる。

3.10 考察

図 20、図 23 では、布の質感表現を行っていないが、布の光学異方性を考慮したものになればもっと現実的な CG 表現ができるものと思われる [70]。

また、計算による布の変形過程を観察したところ、Euler 法のような簡単な積分法を用いても、バネマトリックスモデルで問題となった局所的な布の伸びや、その回復に伴う振動は起こらなかった。計算による布の変形過程は、ビデオにコマ撮りし定性的に評価を行ったところ、現実の布の変形過程によく似ているように感じられた。



図 20: 実物と計算結果の比較

より正確な評価を行うには、計算実験と同じ条件で実際の布の変形過程を観察し、計算結果と比較する必要がある。この実験には、完全に平らな初期形状から瞬間的に自由落下を開始する必要があるが、布が柔軟なゆえに難しいので実験ができない。今後は、実際に観察できる布変形過程と同じ条件下で計算実験を行い、結果を比較、検討を行う必要があると考えている。

布のドレープやしわは、変形過程で形成されるために、変形過程を計算すべきであると考えている。今回の実験では、変形過程の妥当性を定量的に評価することはできなかったが、図 21 のような変形過程を経て、妥当な数のドレープが出現したことより、この変形過程が、妥当な数のドレープを形成するための必要条件を満たしていると考えている。

また、布の形状を計算で求めるにあたっては、計算時間も問題となる。対話的な操作環境を要求される状況においては、多少の形状精度は犠牲にしても高速な応

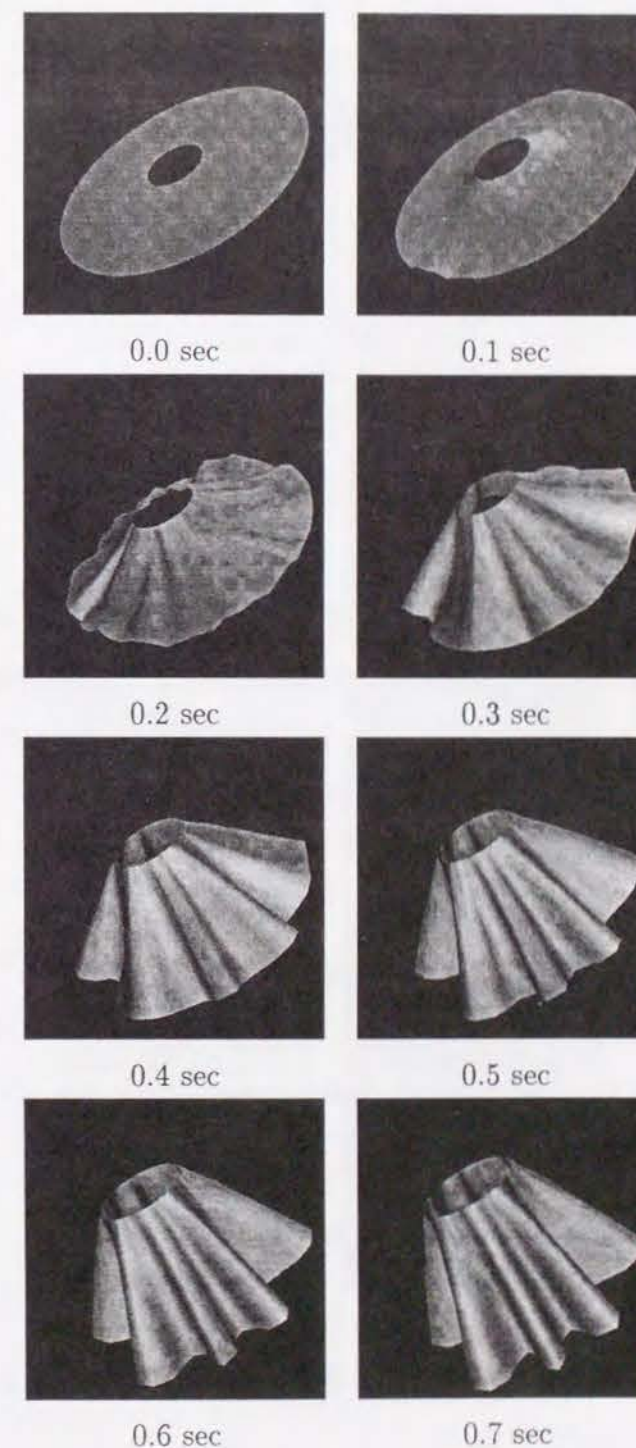


図 21: ドレープ形成過程

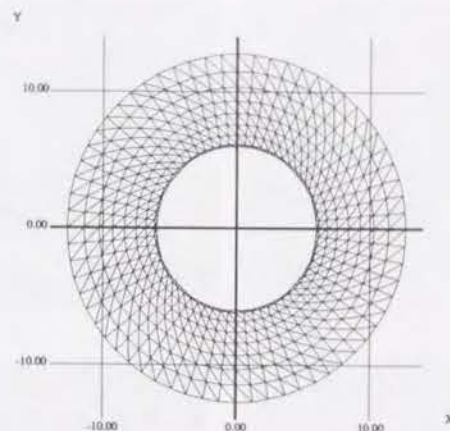


図 22: JIS 規格の初期形状と格子

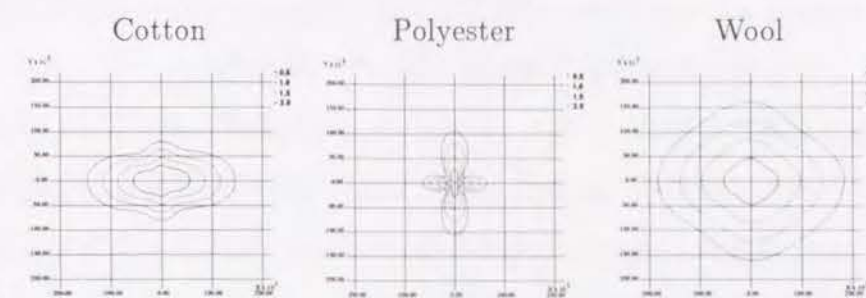
答が優先し、ある程度設計が完成してきたならば、精度を上げて再計算することが実用的である。制約充足型布変形モデルは、計算精度を任意に制御でき、計算精度を落せば計算は早くなる。このような計算速度に関係した計算精度の制御により、実用的な使い方が可能になる。

3.11 結言

衣服の形状計算のために、従来からの幾何学的アプローチと物理的アプローチを統合した、新しい布モデルを提案した。この新しい布モデルは、制約充足型布変形モデルであり、“運動方程式の解を制約条件のもとで修正する方法”に基づいている。この方法の特長は、

- 実際に測定した布の物理特性を形状計算に直接利用できる
- 形状計算では終了条件が満たされるまで反復的に誤差修正を行うために、終了条件の閾値を変更することで計算速度を優先させたり、計算精度を優先させたりすることができる

(a) 布種類

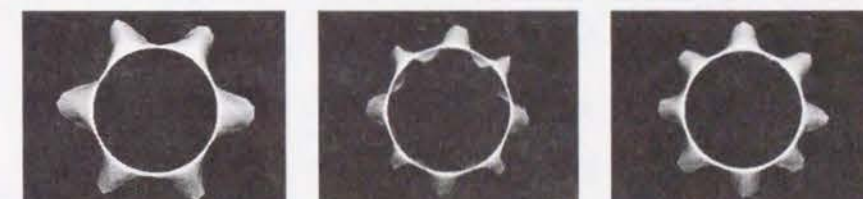


(b) 曲げ異方性

(c) 写真(上)



(d) 計算(上)



(e) 写真(下)



(f) 計算(下)



図 23: JIS 規格のドレープテストの比較

- 形状変化の途中で起こる衝突の影響なども制約条件の一つとして加えることができる

である。また、制約は、制約条件が成り立つときに最小になる評価関数を設定すると、その最小値の探索問題として統一的に取り扱うことができる。この手法は、制約力を運動方程式中に取り込むよりも安定に数値計算ができ、運動方程式を制約条件を満たす座標系へ変換するよりも簡単で汎用性がある。計算実験では、KES法により得られた布の力学特性を用いてドレープテストを行い、実際の布形状に近い形状を算出できることを確認した。

4 格子形成

4.1 諸言

本章では、衣服形状計算に必要な型紙と人体モデルとに適用する格子形成について述べる。衣服の形状は、衣服を構成する布の力学特性と型紙形状、衣服をまとった人体形状とその動き、衣服の着方等さまざまな要因によって決まる。このため、解析的に衣服形状を算出することは困難であり、数値計算を行うことになる。衣服形状を数値計算するためには、まず、型紙と人体形状を格子に離散化する必要がある。さらに、型紙は人体の展開図的な性質を持つために、この格子形成法は、基本的には型紙と人体とに共通して適用可能なものが望ましい。本章では、初期的に形成した初期格子に、滑らかさ、せん断変形、格子間距離からなる幾何学的制約を付加することにより初期格子を改良する格子形成法を提案する。4.2節で、提案されている格子形成法を分類して問題点を述べ、4.3節では、提案する格子形成法についての概念を述べる。4.4節では初期格子の形成方法について述べ、4.5節では初期格子の改良方法について述べる。4.6節では、型紙と人体の格子形成について具体的に述べる。4.7節では数値計算実験を行い、実験結果と評価結果について述べる。また4.8節では考察を行う。

4.2 格子形成の分類

衣服形状を数値計算するためには、まず、型紙と人体形状とを格子状に離散化した表現にする必要がある。これを一般に格子形成と呼んでいる。

格子形成は、グラフィックスのレンダリングや、有限要素法、差分法のシミュレーションにおいても基礎的な技術であり、格子化すべき対象物の形状や、形状計算方法などによって、それぞれに適した格子形成方法を用いる必要がある。

レンダリングでは表現の自由度が大きい三角形、あるいは多角形の格子が多く用

いられる²。格子点は、表現しようとする対象物の形状精度を保存しつつ可能な限り少なくすることが望ましく、初期的に生成した細かい格子構造を最適に統合してゆくか [71][72][73]、または逆に、初期的に生成した荒い格子構造をどのように最適に細分化してゆくかが研究対象になっている [74]。

シミュレーションにおいては、計算精度が格子の形状や配列によって左右される。しかし、どのような格子が必要であるかは、計算結果の計算精度などから評価されるために、前もって必要な格子を定義することは難しく、応用ごとに必要な格子が変わってくる。また、シミュレーションの手法は、有限要素法と差分法に大別でき、その手法の違いによって用いられる格子の種類も変わってくる。

有限要素法では、解析対象物が二次元の場合に、三角形格子が最も多く用いられている。解析対象物が三次元の場合には、四面体や六面体の分割になる。有限要素法では、格子の並びに規則性を必要としないので、格子の大きさや配置は不規則になる。このような格子を不規則格子と呼ぶ。三角格子の形成方法としては、(1) 写像法に基づく方法 [75]、(2) 逐次内部節点を発生する方法 [76]、の二つに大別できる。しかし、(1) では形状変化の大きなところで格子形状が歪むために、計算効率が悪い。また、(2) では比較的よい形状の三角形格子が得られるものの、アルゴリズムが複雑である。

差分法では、微係数が数個の格子点において評価されるために、解析領域全体にわたって規則的に滑らかに並んだ規則格子がよく使われる。また、規則格子には、Thompson らの境界適合格子 [77] が頻繁に利用されることから四角形の格子であることが多い。しかし、この格子形成法は、楕円型偏微分方程式を用いた写像に基づく方法であり、形状変化の大きな境界の近くで格子形状が歪むために計算効率が悪い [78]。

衣服の形状計算においては、衣服形状の表現にはグラフィックスにおけるレンダリングを用いる。この時、格子点の数が多すぎるとレンダリングに時間がかかる。

²グラフィックスでは、格子と言わずメッシュ(mesh)とかパッチ(patch)という用語を用いることが多い。

実用性を考慮すると、格子点の数は多過ぎてはいけない。これは、グラフィックスにおける格子点の制約である。

一方、衣服形状の変形計算はシミュレーションを用いる。布のように大きな変形が起こる物体の形状計算では、大きな変形が起こる部分に格子点が密に分布していることが望ましいが、変形前にどの部分が大きな変形を起こすかは予想不可能である。従って、可能な限り均一に分布した格子点を計算に用いるのが適切である。これは、シミュレーションにおける格子点の制約である。

このように、グラフィックスにおける格子点の制約よりも、シミュレーションにおける格子点の制約の方が厳しいため、シミュレーションに適した上でグラフィックスにも問題なく使える格子点を生成する格子形成法が必要である。本節では、輪郭形状を保存しつつ、規則的に滑らかに整然と配置された境界適合型の規則格子の形成方法を論じる。

一方、衣服の型紙や人体形状の格子化においては、型紙は二次元であり、人体は三次元であるために、一般には異なった手法による格子化が行われる。しかし、型紙は人体形状の展開図的な性質を持つために、両者の格子は基本的には一致するべきである。もちろん、型紙には多少のゆとり量やデザイン性が加味されているので、完全には一致しないが、型紙に三次元的な部分変形操作を加えれば、人体の対応する部分の形状とほぼ等しくなり、人体にフィットする。また逆に、人体の一部を取り出して平面に展開すれば型紙の原型ができる。

このような型紙と人体形状との関係から、型紙と人体形状とに共通して適用できる格子形成が必要である。

4.3 格子形成法の原理

二次元の型紙と三次元の人体形状を同じ基準で格子化するためには、次元に関係しない格子分割基準を用いた上で、

i. 形状の保存

ii. 格子点の連結情報の保存

の条件を満たすようにしなければならない。

また、どのような形の格子に分割するかは、その格子をどのような応用に適用するかによる。格子の形状は、有限要素法では三角形格子が多く用いられ、差分法では四角形の格子が多く用いられる。四角形の格子を対角線で二分すれば、三角形格子が得られるので、本節では、第3章で述べた布の計算モデルが、縦糸、横糸の構造を持っているので、これに対応して四角形の格子を考える。

(i)(ii) の二つの条件を満たす四角形の格子を形成するには、正方格子を対象物の輪郭形状（境界線）に一致するように滑らかに変形させる手法が有用である。この手法は、対象物の上に網をかける操作に相当する。図24に示すように、対象物をXY平面上に投影した輪郭線と格子形状が一致するように正方格子を変形させる。図24では、三次元対象物をXY平面に垂直な方向から見たときに見える部分（斜線部分）に対して格子を形成している。ここで、対象物が型紙の場合には二次元になるが、人体形状の場合には三次元になる。しかし、より一般的な格子形成を想定して、厚みを持たない二次元の型紙も零の厚みを持つものとして、全ての対象物を三次元として扱う。

図24に示すような、格子点が規則正しく並んだ規則格子では、格子の各軸と衣服を構成する布の縦糸、横糸との対応がとれるほか、複数の型紙を縫製する場合に前もって格子点を合わせることができ、衣服の形状計算には都合がよい。その上、規則格子は、不規則格子と比較して、予測不可能な自由変形に比較的柔軟に対応できるので、不規則格子よりも衣服形状の計算には適しているといえる³。

また、衣服形状を実用的な速度で数値計算するには、格子点数を可能な限り減らす必要がある。しかし、格子点数を減らすと境界の形状を正確に保存することが困

³衣服形状の計算においては格子点でしか変形が起こらないために、不規則格子では滑らかな変形が表現できない。

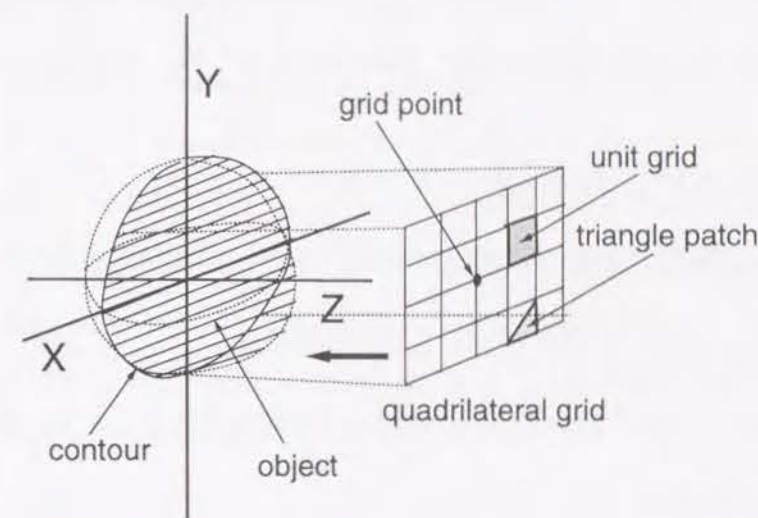


図 24: 格子形成の概念

難になる。また、図24に示すような四つの格子点で囲まれた最小格子である、単位格子の形状も著しく歪んでくるために形状計算の精度が低下する。さらに、変形の自由度も格子点数に比例しているので、格子点数が少な過ぎると滑らかな変形を表現できず、動きがぎこちないものになる。計算速度の向上と計算精度の向上とは互いに相反するので、適切なところで妥協することが重要である。そこで、少ない格子点数でも境界の形状を保存し、また、可能な限り単位格子の形状を正形状に近づける工夫が必要となる。

人体形状モデリングにおいては、人体計測から得られた距離データから初期格子を作り、再構成により格子の最適化を行う方法が用いられる[73][79][74]。しかし、このような方法では接続部分の格子点数を一致させることが難しく、また、格子点数も人体形状ごとに異なる。

人体の前後から測定した二枚の距離画像から格子を形成する場合や、人体に動きを与えるために人体を複数の部品に分割する場合には、前後の格子の貼り合わせや、人体部品の貼り合わせが必要となるために、境界上で指定された個数に分割さ

れた格子が適している。人体形状モデルは、一般に手作業で作成されているので、距離画像から自動的に人体形状モデルが得られるならば、その技術の利用価値は高い。

このような理由から、格子形成には次の基本的な条件、

- a. 格子の輪郭線は対象物の輪郭線と一致すること（境界適合条件）
- b. 複数の格子が互いに接合できること（接合条件）
- c. 内部格子が局所的な制約条件を満たすように制御ができること（制約適合条件）

を満足する必要がある。

さらに、数値計算における経験的な知識として、

- A. 数値計算では微係数が数個の格子点に渡って評価されるために、格子点は滑らかに配置されることが望ましい
- B. 小さなせん断変形で単位格子がねじれたりしないように、せん断角度は零であることが望ましい
- C. 格子点間の伸びが初期長の比として評価されるので、格子点間の距離が極端に短い部分がないように、格子点間距離がそろっていることが望ましい

という条件も可能な限り満足させることが重要であることが知られている。(A)の条件だけでは、単位格子の形が歪みやすく、格子点間隔もそろわないために、(B)(C)の制約条件が必要になる。このような要求を満たす格子を形成するために、“(a)(b)(c)の基本的な条件を満たす初期格子を(A)(B)(C)の制約条件のもとで改良する”手法[3]について述べる。

4.4 初期格子の形成

まず、基本的な条件(a)(b)(c)を満たす初期格子の形成法について述べる。

4.4.1 境界適合条件

境界線上では区間と分割数を指定し、指定区間を均等に分割することにより格子点を配置することで、境界条件は満足される。次に、この境界条件を乱すことなく内部格子を発生させることを考える。境界線上の情報から内部の格子を発生させる手法として、Coonsによる格子形成法がある[80]。これは、単純な二次元線形補間による格子形成手法であるが、境界線上に格子点数を指定できる点が有用である。Coonsの方法により、格子の基本的な条件である(a)輪郭線適合条件を満たす格子が得られる。

4.4.2 接合条件

格子化の対象物が複雑な形状である場合には、複数のより単純な境界域で格子化し、部分格子を接合して一つの大きな格子にする方法が有効である。この場合には、接合部分の格子点数が双方で等しくなければならないので、格子を形成するときに境界線上の任意区間の分割数をあらかじめ設定しておく必要がある。この区間指定や、格子点数の指定を自動的に行うには、対象物の形状や機能に関する解釈が必要であり、簡単にはできないので、この設定は人手によって行うことにする。接合条件が設定できれば、Coonsの方法で接合条件を満たす格子を形成できる。

4.4.3 制約適合条件

生成したい格子には、局所的に格子点をあらかじめ指定しておきたい場合がある。このような場合には、指定点を固定して近傍格子点を滑らかに再配置できることが望ましい。二次元対象物である型紙について具体的に述べると、ダーツやプリーツがこの局所的な制約条件にあたる。

ダーツは、衣服の型紙(平面)を人体(曲面)に貼り付けたときにできる歪を取り除くために設けられる。ダーツの処理は、ダーツ線に沿って両側を縫い合わせることでなされる。ダーツの縫い込まれた部分は、衣服としては冗長な部分であるため

に必要な応じて切りとられたりする。計算では、冗長な計算を省くためにダーツ部分には格子を生成しないようにすると同時に、ダーツライン上に均等間隔で格子が並ぶように計算する。

プリーツは、作意的に衣服にドレープ(ひだ)を付けるために設けられる。プリーツは、設定された対のプリーツライン同士の端点を縫合することが多く、プリーツライン間の布部分が間接的に重要となるために、格子にはプリーツラインを反映する必要がある。これは、プリーツライン近くの格子点をプリーツライン上に均等間隔で並ぶように移動させることで対応する。ただし、ダーツラインやプリーツラインは人間が指定する必要がある。

さらに、内部格子点を局所的に集中させたり、逆に粗くしたりする制御は、形状計算の上で注目領域を設定したり、関心の低い領域の計算を簡単化する場合に必要となる。これには対象物の奥行き情報を制約として格子点を制御できる。対象物が二次元の場合には、平面上に山のような奥行きを与えることで、疑似的に奥行き情報を制約として与えて格子点を制御する。図 25に示すように、奥行きの影響で格子点は山の形に沿って配置される。これにより、三次元情報を持つ格子の二次元写像である平面格子では、格子間隔が制御される。対象物が三次元の場合には、距離情報を奥行きの制約条件として与え内部格子点を制御する。

4.5 初期格子の改良

このようにして生成した格子を格子形成のための初期格子と考え、(A)(B)(C)の制約条件のもとで初期格子形状を改良する。

(A)(B)(C)の制約条件が全て満たされたときに極小値となる評価関数 E を考え、 E の値を最小にする方向に格子点を移動させることで初期格子を改良する。

$$E = \sum_{\Omega} (c_1 E_1 + c_2 E_2 + c_3 E_3) \quad (53)$$

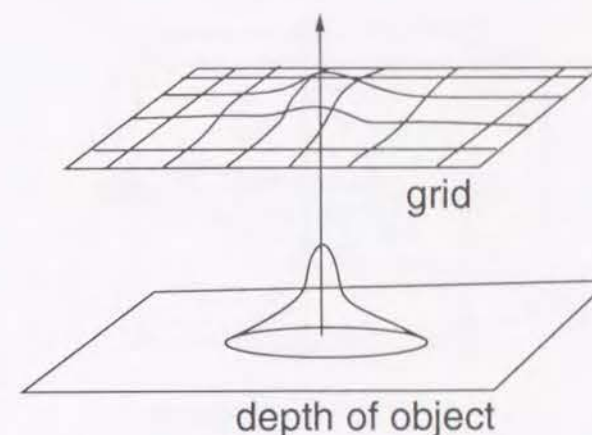


図 25: 内部格子点の制御

ここで、 E_1 は滑らかさを表す関数、 E_2 はせん断変形を表す関数、 E_3 は格子点間の長さの関数である。 c_1, c_2, c_3 は重み係数であり、それぞれの関数の次元を統一する変換係数としての意味を持っている。また、 \sum_{Ω} は全格子点に対して総和をとることを示している。

4.5.1 滑らかさの関数

形成する格子は、(A)の制約条件で述べたように十分な滑らかさが必要である。滑らかさを示す関数として、

$$E_1 = \frac{1}{2} \left(\mathbf{r} - \frac{1}{4} \sum_{a \in \mathcal{M}} \mathbf{r}_a \right)^2 \quad (54)$$

を用いる。ここで \mathbf{r} は点 i の格子点の座標 (x, y, z) を示し、 \mathbf{r}_a は点 i の四近傍点を示す。各格子点は図 26に黒丸で示すような、縦方向と横方向の四近傍の格子点と連結情報を持つ。

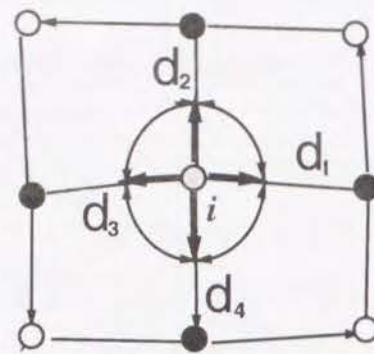


図 26: 格子点の連結情報

4.5.2 セン断変形の関数

(B) の制約条件で述べたように、単位格子は歪みの少ない長方形に近い形状であることが望ましい。この制約には、せん断変形が零のときに最小値を持つ次の関数を用いる。

$$E_2 = \frac{1}{2} \sum_{k \in \mathcal{M}} (\mathbf{d}_k \cdot \mathbf{d}_{km})^2 \quad (55)$$

ここで \mathbf{d}_k と \mathbf{d}_{km} は、図 26 に示すような格子軸に沿った単位ベクトルであり、添字 km は、 $km = (k+1) \bmod 4$ である。つまり、(55) 式は、全ての格子軸間の角度が直角になったときに最小となる。

4.5.3 格子点間隔の関数

(C) の制約条件で述べたように、形成する格子点間隔はそろっていることが望ましい。これは、格子点間隔を均等にする制約条件になる。今、点 i の格子の u, v 軸の格子端点 (図 27 の ⊕ 点) から点 j までの格子点間の距離の和で求まる長さを l^1, l^2 とすると、各軸方向で格子点間隔が均等になったときに最小値をとる関数は次式で与えられる。

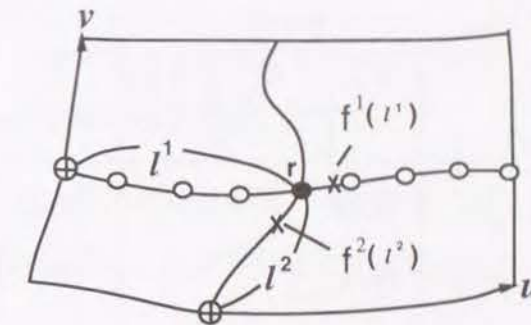


図 27: 長さの制約

$$E_3 = \frac{1}{2} \sum_{k=1,2} (\mathbf{f}^k(l^k) - \mathbf{r})^2 \quad (56)$$

ここで、 l^k は格子点 i の k 軸の格子端点からの、軸に沿った格子点の並びに従った格子点間の距離の和である長さを表し、 $\mathbf{f}^k(l^k)$ は k 軸 (u, v) 方向の長さをパラメータとした、各格子点を結んだ直線の関数である。各変数の意味を図 27 に示す。

4.6 型紙と人体形状からの格子形成

型紙及び人体形状からの格子形成の方法についてそれぞれ具体的に説明する。

4.6.1 型紙からの格子形成

入力は一パレル CAD 等の CAD データである。この CAD データには、格子形成のための情報が不足しているので、足りない情報を以下の (1)~(4) の手順で与える。

1. 型紙の形状データから閉図形を取り出す。このときに、縫いしろ等の直接衣服形状に関係しないところは取り除く。

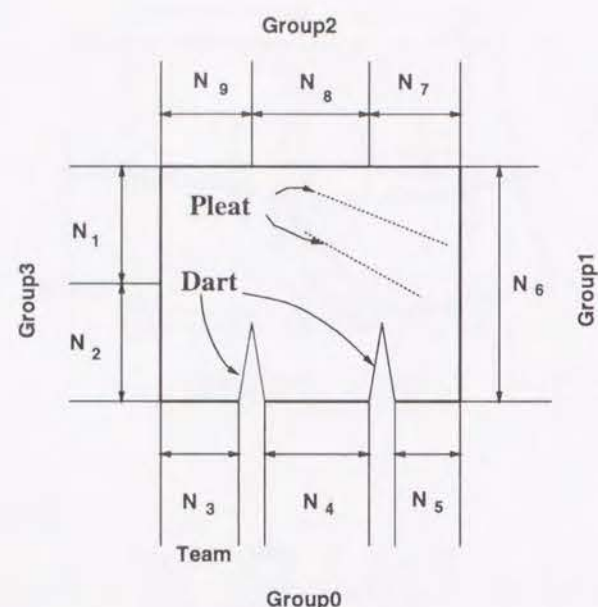


図 28: 型紙の分割情報

2. 閉図形を縦糸方向 (Group0, Group2) と横糸方向 (Group1, Group3) とに分ける。構造格子であるためには、Group0 と Group2, Group1 と Group3 の格子の数は等しくなければならない。そこで、図 28 に示すように、分割情報 (N_x) により格子の数を指定する。ここで、例えば、 N_1 は Team 1 の分割数を示す。
 3. 設定した Group の中で、特徴的な部分をさらに特定するために Team を設定する。Team は、例えば、袖の縫い合わせ部分とか、ダーツラインに挟まれた部分のように何らかの機能的な意味を持つ。
 4. 各 Team に分割数 N を設定する
- 次に格子を形成する。
5. 各 Team の始点と終点に格子点を配置する。
 6. 各 Team の長さを計算し、分割長を求め、均等にその間に格子点を配置する。

7. 輪郭部分の格子点を基に、Coons 分割を行い内部格子を形成する。
8. 内部格子にダーツやプリーツの情報をラインで与え、各ライン付近の格子点をライン上に均等間隔で配置する。
9. こうしてできた初期格子に滑らかさ、せん断角、長さの制約、奥行き情報を与え、(53) 式の評価関数の変化が閾値以下になるまで (57) 式を繰り返し計算する。

$$\mathbf{r}^{(m+1)} = \mathbf{r}^{(m)} - \gamma \sum_k^3 \mathbf{R}_k \quad (57)$$

γ は反復計算におけるステップ幅であり、 \mathbf{r}^m は (54)(55)(56) 式の勾配である。 (m) は計算の繰り返し回数を示している。

(54)(55)(56) 式の勾配は (58)(59)(60) 式に示す。

滑らかさの関数の勾配

$$\mathbf{R}_1 = c_1 \left(\mathbf{r} - \frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 \mathbf{r}_n \right) \quad (58)$$

これは、注目格子点を、その近傍格子点の中心に押しやる力であり、注目格子点に対する局所的な修正力である。

せん断の関数の勾配

$$\mathbf{R}_2 = c_2 \sum_{k=1}^4 (\mathbf{d}_k \cdot \mathbf{d}_{km}) \mathbf{T}_k \quad (59)$$

これは、誤差角度に対応する回転力であり、注目格子点とその近傍格子点に作用する局所的な修正力である。回転方向は、 $\mathbf{T}_k = (\mathbf{d}_k \times \mathbf{d}_{k+1}) \times \mathbf{d}_k$ である。

格子点間隔の関数の勾配

$$\mathbf{R}_3 = c_3 \sum_{k=1,2} (\mathbf{f}^k(l^k) - \mathbf{r}) \quad (60)$$

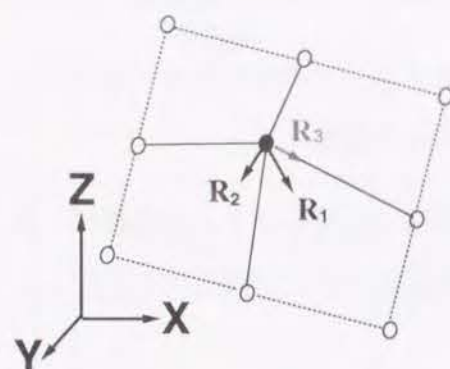


図 29: 力のつりあい

これは、 u 軸、 v 軸での長さに対して格子点間隔をそろえようとする大域的な力である。

重み係数 c_1 , c_2 , c_3 は、バネ係数 (dyn/cm) に相当する。(57) 式で図 29 に示すような三つの力がつり合うように反復修正が行われる。

4.6.2 人体形状からの格子形成

人体形状を格子で近似する主な目的は、形状データ量の圧縮にある。三次元計測等で得られる形状データは一般に膨大な量の数値データとなるために、計算処理において取扱が困難になる。形状を少ない数の格子で表現できれば、三角パッチや曲面等の交点計算アルゴリズムが適用しやすくなり、衣服と人体との衝突計算に有利であり、スムーズシェーディングのようなレンダリング処理も高速に行える。また、形成された三次元格子を二次元平面で展開すれば、型紙に相当する展開図が得られる。このような手法は、パーソナルな衣服のデザインのための型紙設計にも役立つと考えられる。

人体形状の格子形成手順は型紙の場合とほとんど同じであるが、ダーツやプリーツの情報がないかわりに、図 35 に示すように、頭部、胸部等の複数の部分に分け

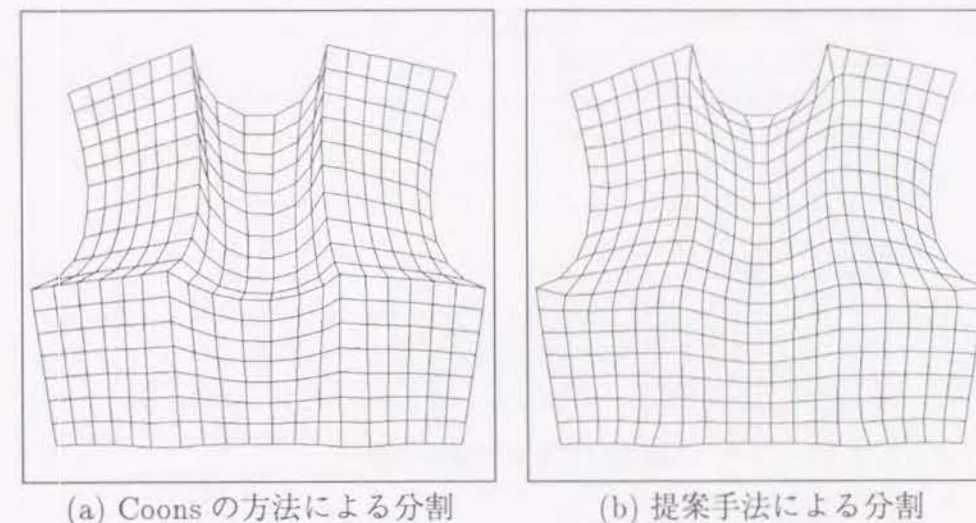


図 30: Coons の方法と提案手法による分割

る必要がある。また、腕の付根と腕の格子点数が一致するような分割数を設定する必要がある。奥行き情報には距離画像を用いる。

4.7 計算実験

4.7.1 型紙の格子形成実験

ワンピースの前身頃の部分の型紙を、Coons の分割法で格子形成した結果を図 30(a) に示す。輪郭形状の変化の大きなところの格子が小さくなるために、十分に滑らかな格子が形成されたとはいえない。この Coons の分割法による格子に、滑らかさ、せん断、長さの制約を加え、(57) 式の反復修正計算を行った結果を図 30(b) に示す。格子点の並びが滑らかになり、格子点間距離のばらつきが減少していることが分かる。

図 31 は、反復修正時のエネルギーの減少の様子を示す。(1) 式で定義されたエネルギーは、(57) 式の反復修正により単調に減少していく様子が分かる。

図 32 には反復修正前後の長さ、角度、面積分布の比較を示す。反復修正により、

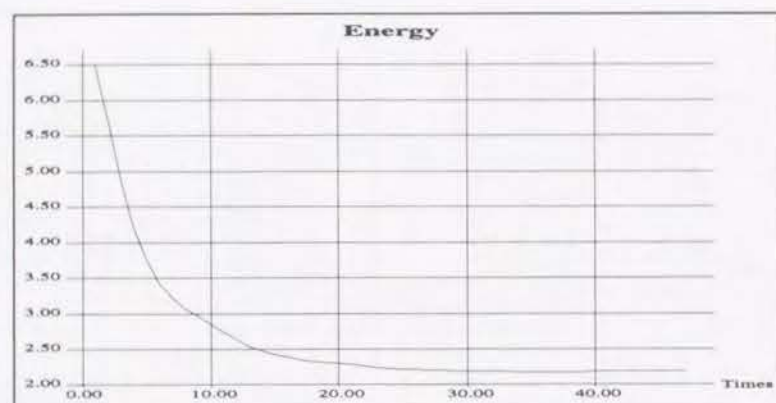


図 31: エネルギー減少の様子

単峰性が増加しており，単位格子の大きさや形状がそろっていくことが分かる．また，このとき， u 軸方向の長さは $2.54 \pm 0.27\text{cm}$ の範囲から $2.40 \pm 0.27\text{cm}$ の範囲に， v 軸方向の長さは $2.24 \pm 0.32\text{cm}$ の範囲から $2.22 \pm 0.23\text{cm}$ の範囲，せん断角度は $0.34 \pm 27.63\text{deg}$ の範囲から $0.41 \pm 16.54\text{deg}$ の範囲に，それぞれ改良された．

図 33 にダーツ情報による制約を付加した Coons の分割法による結果 (図 33(a)) と提案手法による反復修正後の結果 (図 33(b)) を示す．このようなダーツにより格子点が制約されても，提案手法では制約格子の近傍格子点が移動し，全体として長さ，角度，面積分布がそろってくる．

4.7.2 人体形状からの格子形成実験

人体形状は，NKK 社の三次元曲面形状計測装置 VOXELAN により測定した三次元距離データを使用した．人体頭部はレーザ光線の反射が小さくなり測定不能になるので，白色の包帯を巻いて前後二方向から測定し，二枚の距離画像を得た．

図 34 に人体距離データを疑似輝度表示した画像を示す．人体形状は図 35 に示す部分で分割した．人体距離画像と人体形状格子との誤差の評価は図 36 に示すように，人体格子から作成した三角パッチからなる人体モデルの前面に対して距離画像

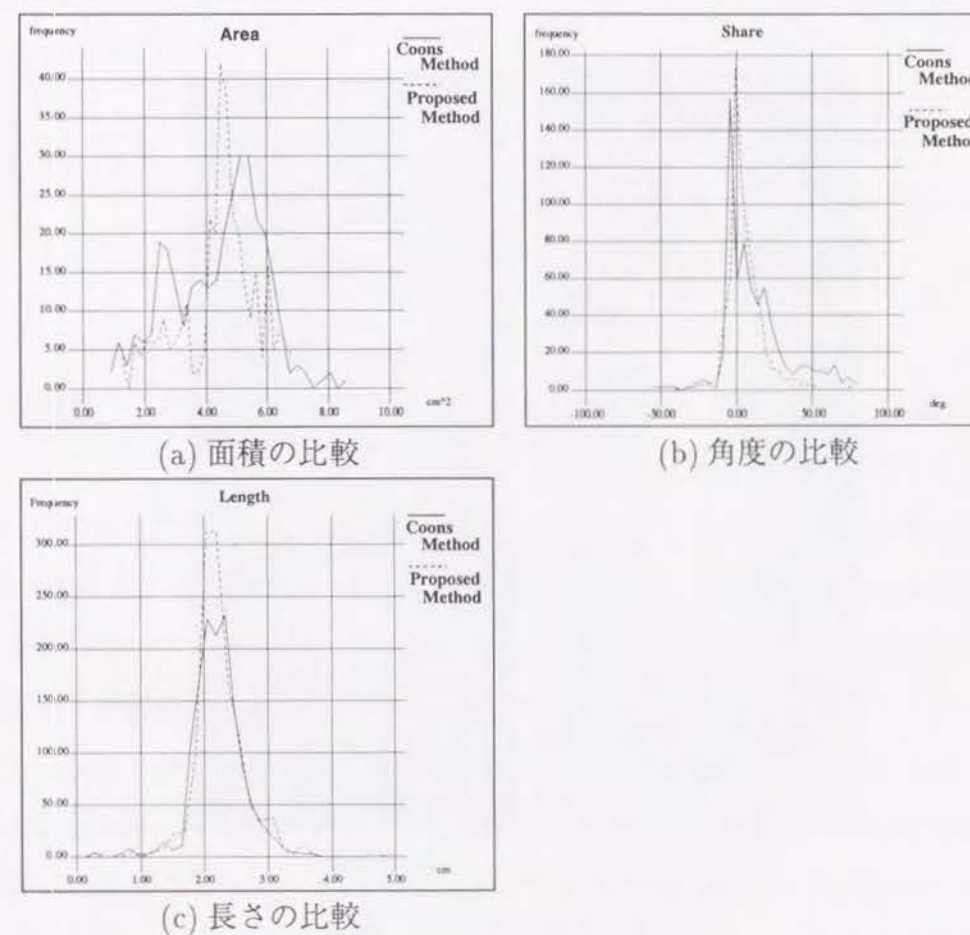


図 32: ヒストグラムによる比較

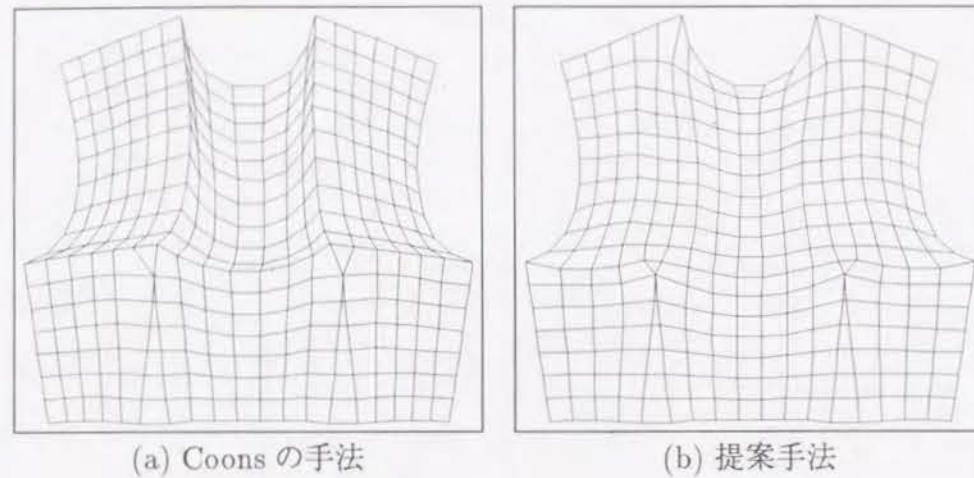


図 33: ダーツ情報を与えた結果

Z_e を作成し、実際の三次元計測による距離画像 Z_r との差を求めた。各部分の格子点数とそのときの誤差を表 2 に示す。

図 37 に誤差画像と人体モデルのレンダリング結果を示す。手の甲、足の甲、顔の部分で誤差が大きいが、これらの部分は、測定誤差が多いところでもあり、また、形状が複雑であるために設定した格子点数では十分に近似できていないからである。このような場合、ノイズを除去した後に、適応的に格子点数を増やせば誤差は小さくなる [74]。また、測定した人体距離画像にはノイズが含まれている。とりわけ、顔の部分や、胸部のように平坦でない部分ではノイズが多い。本手法による格子では、格子の滑らかさも制約条件にしているために、ノイズの部分は平滑化された結果となるが、このような部分もこの評価方法では誤差となって現れている。実際に、人体形状が有効測定データの 3.3% の格子点で近似できていることを考えると、データ圧縮の目的は十分果たしていると考えられる。

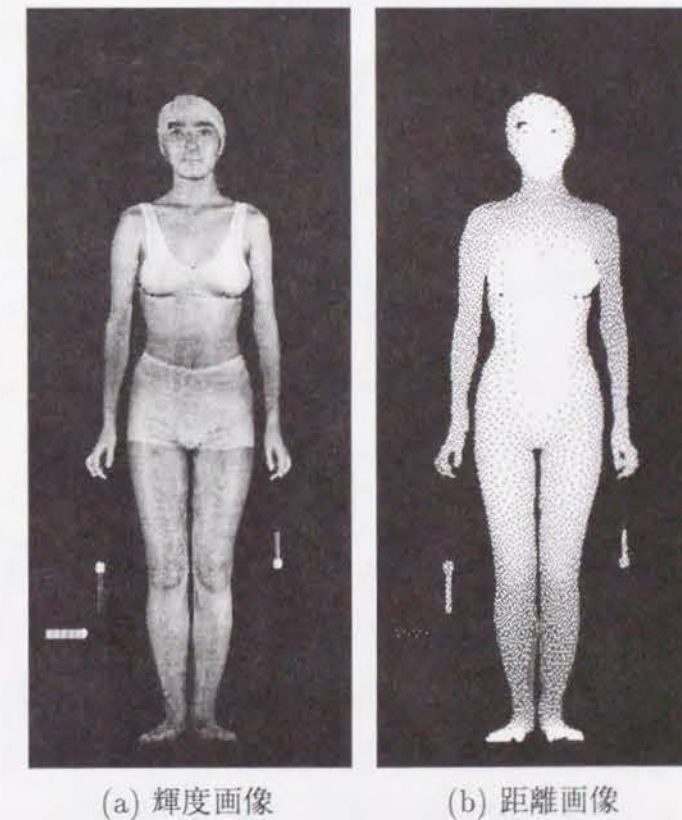


図 34: 人体の輝度画像と距離画像

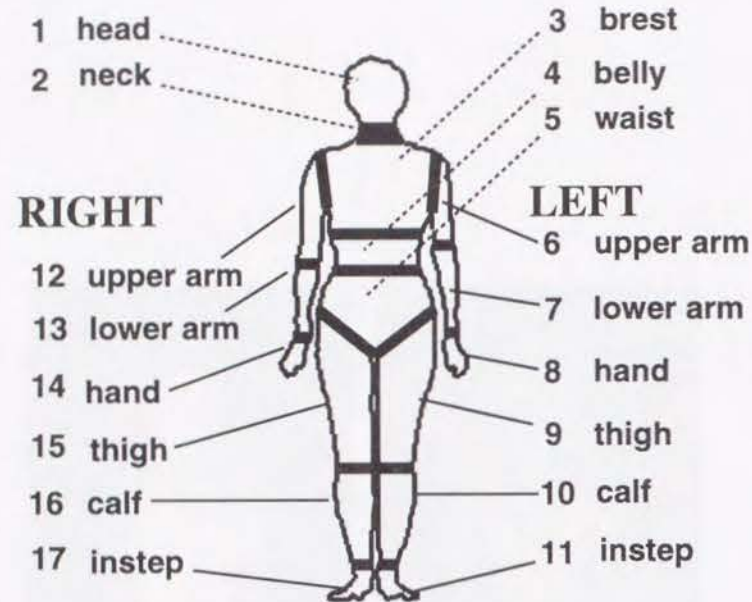


図 35: 人体形状の分割

4.8 考察

本章で提案した格子形成法は、初期格子を幾何学的な制約のもとで改良していくものである。型紙からの格子形成では、反復計算で制約が充足され、格子が改良されていくことを実験により確認した。制約として取り上げたのは、滑らかさ、せん断、格子間隔である。この制約に、物理的な制約、例えば、布の力学特性も使えば、その布の動きを表現するのに適した格子形成ができる可能性がある。さらに、布の力学特性から、その布の柔らかさ、すなわち、必要な格子点の数を推定できれば、人手で与えていた格子分割点数を自動設定できるようになる。今後は、初期格子を物理的な制約と幾何学的な制約のもとで改良していく、格子形成についても考えていきたい。

人体からの格子形成では、形状精度の高い人体モデルを得た。この人体モデルに、姿勢や動きを与えることは比較的容易である。図 35に示すように、作成した

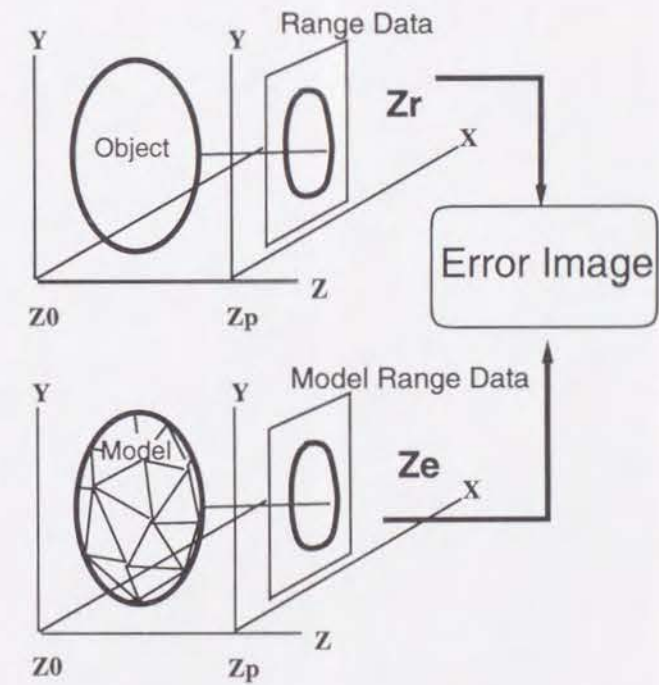
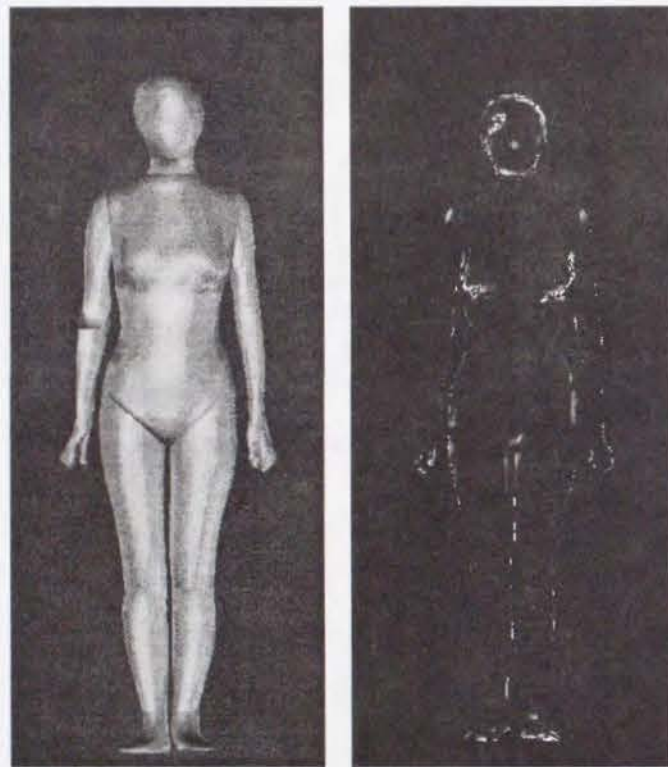


図 36: 評価方法



(a) 生成画像

(b) 誤差画像

図 37: 生成画像と誤差画像

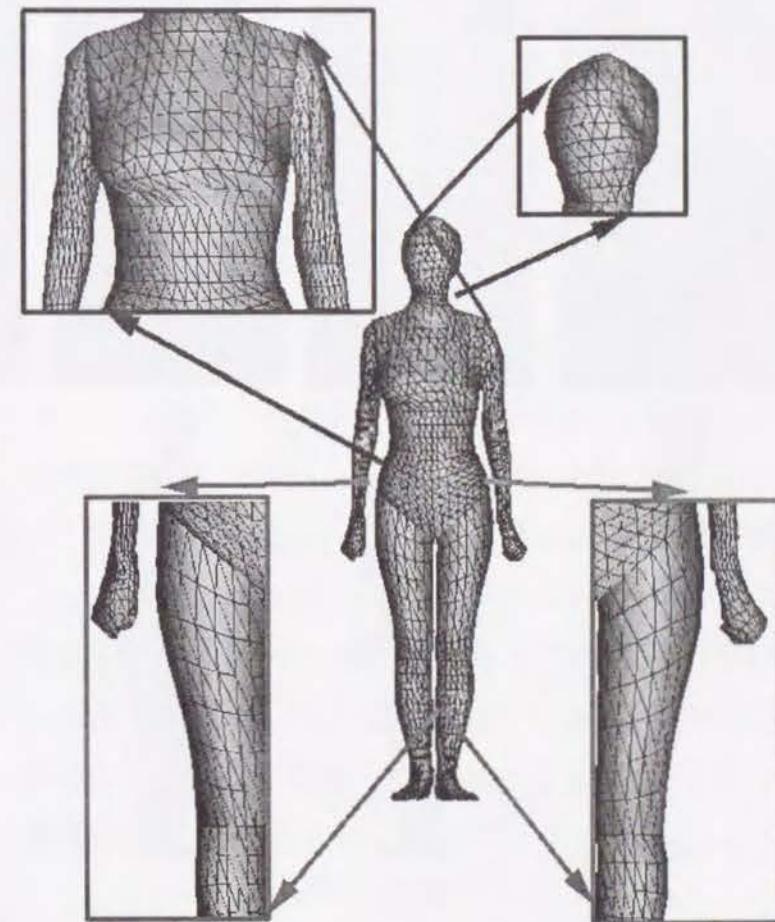


図 38: 人体モデルの格子

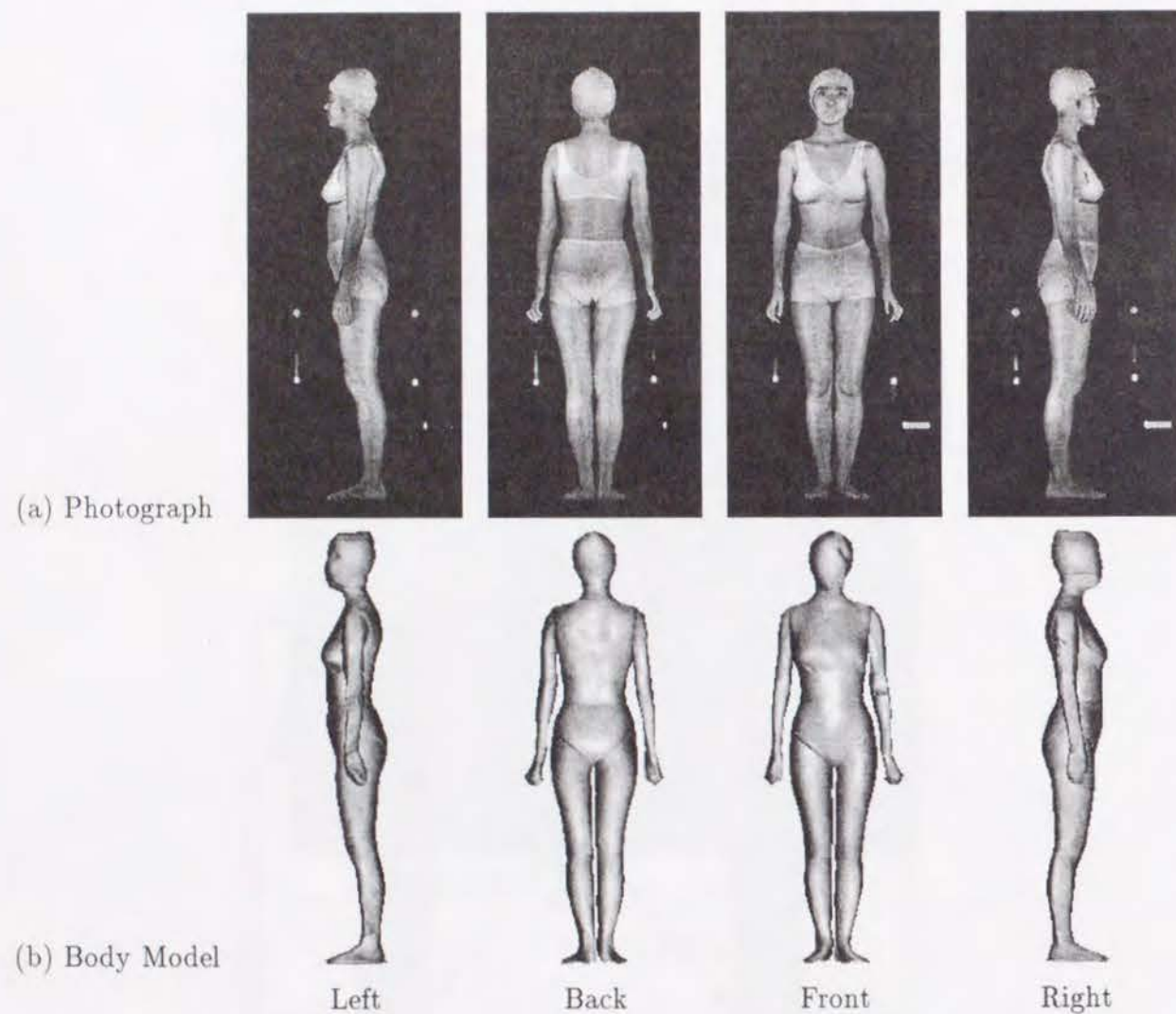


図 39: 写真と人体モデルの比較

No.	Grid	Error	No.	Grid	Error
1	10 × 10	4.3 ± 6.7	10	8 × 8	-0.0 ± 1.5
2	4 × 6	-0.1 ± 2.7	11	8 × 8	0.7 ± 3.5
3	11 × 16	1.1 ± 4.1	12	8 × 8	1.5 ± 2.9
4	8 × 8	0.6 ± 0.9	13	8 × 8	0.2 ± 0.9
5	10 × 16	0.9 ± 1.5	14	8 × 8	2.1 ± 3.7
6	8 × 8	1.7 ± 1.7	15	8 × 8	1.5 ± 1.9
7	8 × 8	0.4 ± 1.0	16	8 × 8	-0.1 ± 1.4
8	8 × 8	2.6 ± 3.5	17	8 × 8	3.2 ± 13.6
9	8 × 8	1.7 ± 1.7	Total	12520	1.4 ± 4.2

2548 points 6168 triangle patches (3.3 % of effective data)

表 2: 人体モデルの誤差

人体モデルは17の部分に分割してある。GLやPHIGSなどのグラフィックスライブラリーを用いて、これらの部分を木構造で連結すれば、一部分の回転や移動の影響は木構造の下位の部分に反映されるようになる。そして、各部分に回転、移動変換を施せば、人体の姿勢や動きを作ることにもできるようになる。また、人体モデルを視覚的にリアルに見せるために、肌画像のテクスチャマッピングや、筋肉のもりあがり表現するバンプマッピングを施すこともできる。髪の毛を表現する研究もなされているので、これを用いることもできる。しかし、実際の人間のように見せるにはディテールが大きな問題となる。いかに、生きている人間のように見せるかは、今後の重要な課題になると思われる。

4.9 結言

衣服形状の計算のための新しい格子形成法について述べた。格子形成は、衣服の形状計算の出発点である。型紙の格子形成が満足に行われないと、形状計算も満足できる結果が得られない。

本章では、滑らかさとせん断変形、格子点間距離を制約条件として、Coons の格子を改良する格子形成法を提案した。本手法は、対象物が二次元の型紙でも、三次元の人体形状でも適用可能である。

計算実験において、型紙の場合には型紙特有の条件を取り込んだ、良質の格子が形成ができることを確認した。単位格子の大きさがそろっているために、滑らかな変形形状が計算可能である。また、人体モデリングでは測定データを圧縮できることが確認できた。型紙及び人体のいずれの場合でも、滑らかさ、せん断変形、格子点間距離からなる評価関数の値を最小にするという意味で良好な格子が形成でき、本手法の有効性を確認することができた。

格子形成には、対象とする計算に適した手法を選択する必要があるが、あらかじめ格子点数が決まっている場合の型紙や人体形状の格子化において本手法が有効である。

5 衝突の計算モデル

5.1 諸言

本章では、動的に変形する衣服と人体との衝突を、摩擦と跳ね返りの影響をも含んだ制約条件とみなした制約充足型アプローチによる衝突の影響の計算方法とその応用について述べる。

衣服の変形過程は、衣服の自己衝突と人体形状に影響されるため、衣服形状を計算するには、これらの衝突を計算する必要がある。また、衣服を着た人間が動く場合には、衣服の動きと人体の動きの両方を考慮した衝突計算を行わなければならない。

5.2節では衝突のモデル化について述べ、衝突の物理モデルと幾何モデルについて考察する。5.3節で、衝突の物理モデルによる具体的な衝突計算方法について述べる。物理モデルでは、人体が動く場合には衝突検出の効率が低下するが、幾何モデルを併用することで効率が良くなる。物理モデルと幾何モデルを段階的に併用する衝突モデルについては、5.4節で述べる。5.5節では、衝突の計算モデルを用いた衣服形状計算方法について述べる。5.6節で、数値計算実験を行い提案方法の有効性を確かめる。5.7節では結果についての考察を行う。

5.2 衝突のモデル化

着装時の衣服形状は、衣服と人体、もしくは、衣服同士の接触や衝突に大きく影響される。現実世界ではこのような衝突は自然に起こるが、仮想現実環境では衝突計算を行わないと衝突は起こらず、衣服が人体を擦り抜ける。このために、衝突の計算モデルが必要になる。

ところが、衣服と体との相互作用である衝突の計算は複雑である [43]。特に、布と人体の衝突のように、全く物理的な性質の異なるものの衝突は異性体間問題と呼ばれ、厳密な解析は極めて困難な問題である。プラスチックのような固体同士の

衝突は研究されている [81] が、布のように軟らかい物体の衝突に関する研究はまだ十分ではない [62, 47, 65, 46, 64].

従来から衝突現象をモデル化する方法として、(1) 衝突の物理モデルと (2) 衝突の幾何モデルが提案されてきた。衝突の物理モデル [81][82][56] は、(a) ペナルティ法を使う方法と、(b) 作用、反作用の法則を使う方法に分けられる。ペナルティ法を使う [46, 53] は、物体間の距離に関係した斥力が働くとするモデルであり、衝突現象を運動方程式に組み込むことができるため、計算が容易であることが大きな利点である。しかし、実際の衝突現象は、物体間の距離に関係したバネの力のような斥力ではないために、衝突現象をうまく計算するための適切なバネ定数の設定が難しく、布が人体内部に入り込んでしまったり、急激に跳ね返されたりする問題がある。

作用、反作用の法則を使う方法は、運動量保存則を使って衝突力を計算する方法である。Thalmann らは、作用、反作用を計算し、マリリンモンローの衣服の動きを表現している [47]。しかしながら、この手法では摩擦は考慮されているものの跳ね返りは考慮されていない。また、反作用力として運動方程式に取り込んでいるために計算が不安定になりやすい。さらに、この研究では、リアルなアニメーションを作成することに重点が置かれているために、実際の布特性を容易に取り込めないという欠点がある。

本来、衝突は、衝突物、被衝突物間の運動量の交換である。従って、作用、反作用の法則を計算することが望ましい。しかし、斥力や反作用力としてではなく、衝突による制約として取り扱うのが良い。衝突による影響を制約とすることで、実際の布特性を反映した衣服の動的形状計算が可能になる。また、運動量の交換においても、摩擦や跳ね返りを取り入れることができるために、リアルな動きが表現できる。

また、衣服も人体も、その形状が変化するため、球や楕円体のような単純な要素

では表現できない。人体モデルや衣服モデルは、数千個のパッチから構成されているために、効率の良い衝突検出方法も必要になってくる。

本論文の衣服の動的形状計算では、衣服を構成する布を分割して多くの微小な質点で表現し、各質点がパッチで構成される人体と衝突した時、どのように跳ね返されるかを計算した後、各質点間に布の自己形状を保持する制約を与えて衣服形状を計算する。2章で述べた布の計算モデルでは、衝突による影響は、単に新しい制約条件が一つ加わったにすぎないため、衣服の形状計算に取り込むことは容易である。

このような衝突の計算モデルは、衝突検出と衝突処理に分けられる。衝突検出では、どことどこが衝突するかを計算し、衝突処理では、どのように跳ね返るかを計算する。衝突検出は、さらに、交差可能性判定と交点計算に分けられる。

交差可能性判定では、衣服の質点が人体のパッチと衝突する可能性を判定する。衝突する可能性がある場合には、質点がパッチのどこと衝突するかを交点計算により算出する。5.3節で、具体的な衝突計算方法について述べる。

衝突の物理モデルによる、衣服が人体の動きに追従する過程は、(1) 人体の動きに伴い、人体と衣服との衝突が起こる、(2) 人体との衝突で動かされた衣服の形状保持力が働く、(3) 衣服の動きに伴い、衣服と人体との衝突が起こる、の繰り返しとなる。

衝突の物理モデルは、単位時間内に衝突と形状保持力が働くので、時間的にミクロな視点でのモデルである。この場合、人体の動きによる衝突を介した衣服の動きが、人体の動きよりも小さい場合には、人体が衣服を通り抜けてしまう。衝突による衣服の動きが、人体の動きよりも大きくなるとは限らないことから、衝突の物理モデルではこのような問題が起こる可能性がある。この問題は、単位時間を非常に小さく設定して、人体と衣服との衝突が連続的に起こるようにすれば解決できるが、衣服形状計算の計算効率が悪くなる。

衝突の物理モデルで問題となるのは、人体が動く場合の衝突検出である。衝突検出は、布モデルの質点（衝突物）位置から、探索ベクトル（単位時間 Δt での質点の動き予測ベクトル）に沿って、衝突するパッチ（被衝突物）を調べると探索効率がよい[4]。しかし、この場合、図40(possible)の場合に示すように、探索ベクトルの範囲に被衝突物がある場合には衝突検出可能であるが、図40(impossible)の場合のように、その範囲に被衝突物が存在しない場合には、衝突検出が不可能になる。探索空間を拡大すれば、このような検出洩れは少なくなるが、探索効率が悪くなり計算に時間がかかる。図40(impossible)の場合が起こるのは、衣服と人体の両方が動く場合である。人体と衣服との相対速度が小さい場合に衝突検出はできるが、人体と衣服との相対速度が大きくなると衝突検出ができなくなる。

衝突の物理モデルでは、人体の動きが衝突を通して衣服に伝わり、その結果として衣服が人体の動きに追従するという考え方である。これでは、人体の動きが衣服に伝わる瞬間は、両者の相対速度は大きなものになる。

衝突の幾何モデルは、(a)解析法を使うものと、(b)FFD(Free Form Deformation)を使うものに分けられる。解析法[81, 83, 56]は、衝突点を算出し、衝突点を越えた部分を衝突点まで移動させる計算である。FFDを使う方法では、人体の動きを制御点の動きにして、衣服形状を変形する。これらの幾何モデルでは、衝突を幾何学的に算出し、衣服形状も幾何学的に計算するために、斥力のような仮想的な要因が入らず計算は安定している。

しかし、これらの幾何モデルでは、摩擦係数や弾性係数などの衝突時に重要な働きをする要因を取り込むことができない。また、衣服形状も、布の力学特性の反映したものにならないという欠点がある。

衝突の幾何モデルによる、衣服が人体の動きに追従する過程は、(1)人体と同一運動系に属する衣服部分とを対応付ける、(2)人体と対応する衣服の部分の動きを人体と同じにする、の繰り返しとなる。これは、単位時間毎に衣服を人体と同様

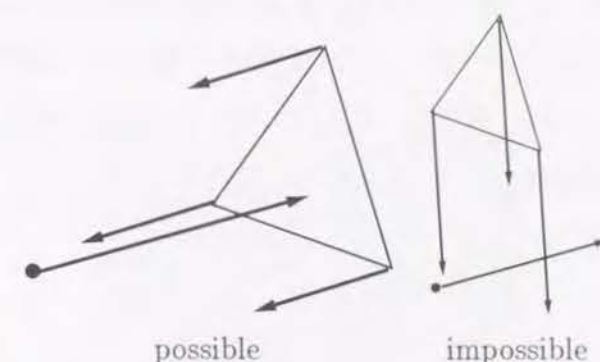


図 40: 衝突検出可能/不可能

に移動するので、時間的にマクロな視点でのモデルであるといえる。人体に近い距離にある衣服部分は、人体と同じように動くので、同一運動系に属すると見なせる。しかし、この幾何モデルでは、人体と衣服の対応関係が変化しない限り、衣服は人体と同じように動くために、衣服は人体に貼りついたようになる。しかし、幾何モデルを使うと、人体と衣服との相対速度を小さくできる。

しかし、実際に我々が衣服を着て動く場合を考えると、衣服が人体に接触している限り、常に人体と衣服との相対速度は小さい。この事実は、物理モデルとは対称的な衝突モデルである幾何モデル[84]に近い。幾何モデルで人体と衣服との相対速度を小さくしてから、物理モデルを使えば、衝突検出漏れはなくなり、リアルな衣服形状を算出できると思われる。衣服と人体との衝突は、衣服を構成する布の格子点と人体を構成するパッチとの衝突でモデル化する。すなわち、点の運動がパッチと衝突して、どのように変化するかを計算すればよい。この物理モデルと幾何モデルを段階的に併用する衝突モデルについては5.4節で述べる。

5.3 衝突の計算方法

今、衣服を衝突物とし、人体もしくは衣服自身を被衝突物とし、衣服と人体、衣服同士の自己衝突の計算を考える。衝突の処理は、衝突の検出と衝突時の作用、反

作用の計算からなる。今、動く衣服と人体との衝突を考えると、衣服の動きは、人体の動きに対応して起こるので、衣服と人体との相対的な速度は小さいとみなせる。このような場合には、衣服側 (P_A) が人体のどの部分 (P_B) とどのように衝突するかを計算すればよい。

衝突の計算は、

1. 交差可能性判定
2. 交点計算
3. 衝突処理

に分けられる。ここで、交差可能性判定とは、 P_A が P_B と衝突する可能性があるかどうかを調べる処理である。この処理では、 P_A の速度ベクトルの方向を探索し、 P_A が Δt 時間間隔の間に進む軌跡の中に P_B が含まれるかどうかを調べる。また、交点計算とは、交差可能性判定で衝突する可能性がある場合に、 P_B のどの部分と交差するかを計算する処理である。そして、衝突処理とは、衝突による作用、反作用を計算する処理である。

本節では、交差可能性判定を行う方法を述べた後、交差計算方法、及び、衝突処理の計算方法について述べる。

5.3.1 交差可能性判定方法

衝突の検出計算は、要素とテストベクトル（一般には速度ベクトル）との交点計算による距離の算出である。基本的には、全ての要素に対して交点計算を行い、最も近い距離を求めればよいが、これは全探索であり計算量は、全要素数を k 、全検査点を r としたときには $O(kr)$ になり、非常に時間がかかるので高速化の工夫が必要になる。

この問題に対しては、交点計算を行うべき要素を選定し、あらかじめ不必要な交点計算の回数を減らす方法が有効である。これは、数多くの要素の中から、衝突す

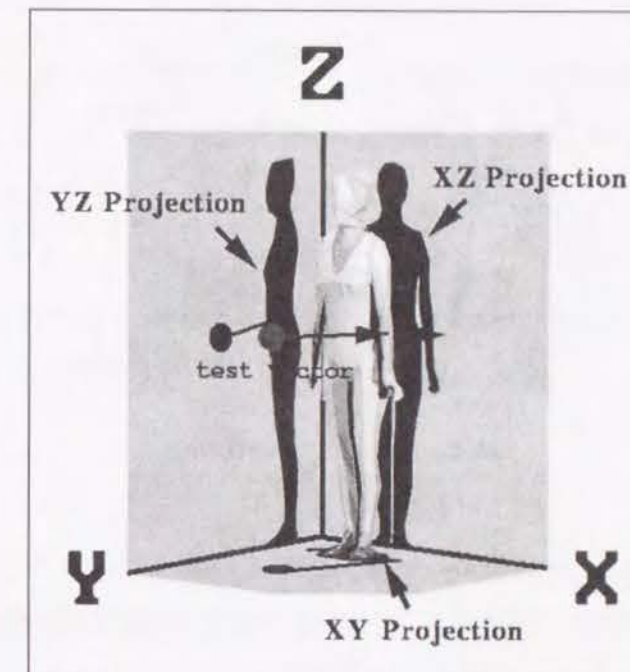


図 41: 人体モデルとテストベクトルの射影

る可能性の高いものを搜し出し、衝突する可能性のない要素に対する交点計算を省く方法である。これには、3角パッチを包む境界箱 (bounding volume box) を設定し、2分木の木構造にする方法がよく用いられる。

静止画を生成する光線追跡法のように、物体が動かない場合には1回の2分木の作成で高速な計算が可能になる反面、物体が動く場合にはシーン毎に2分木を作り直す必要があり、2分木生成に手間がかかるという欠点がある。そこで、本章では手間のかかる2分木を作成する必要のない方法を提案する。

衣服と人体とが衝突する可能性のある範囲は、衣服の範囲を外接する直方体の各辺に、布の変形速度の最大値 \dot{r}_{max} を加えた直方体の内側だけである。布の変形速度は有限であるので、衝突探索範囲は、衣服と人体が共有する空間に最大移動速度分の余裕を含めた空間に限定される。

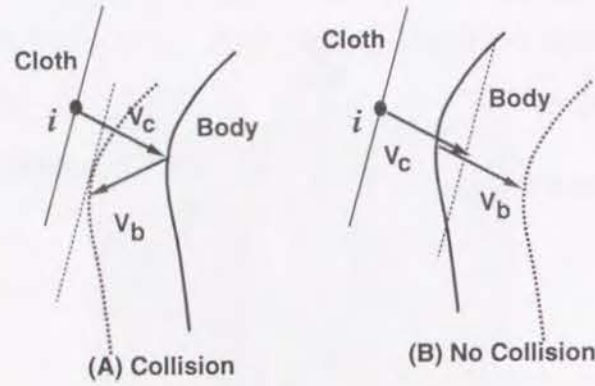


図 42: 布と人体との衝突例

図 41 に示すように、人体モデルと衝突候補点の速度ベクトル (テストベクトル) を XY , XZ , YZ 平面に射影する。この時、テストベクトルの各平面での射影と人体モデルの射影とが 3 平面で同時に重なる場合にのみ衝突が起こる。3 平面の重なり部分で含まれるパッチの数が最小部分に注目すれば、要素の数も数個と少ないために、比較的高速に衝突点を探すことができる。

さらに、二つの物体が衝突するかどうかは、物体の位置と物体間の速度ベクトルで決まるので、動く物体同士の衝突は、衝突物、被衝突物それぞれの速度ベクトルに注目しなければならない。衝突物の速度ベクトルが同じ場合でも、図 42(A) に示すような場合には、布と人体との衝突が起こるが、図 42(B) に示すように人体が布の移動速度ベクトルと同じ大きさで同じ方向に動いていた時には衝突は起こらない。

また、点 i に向かって動いている点は $\mathbf{r}_i \Delta t$ の区間に入っていなくても他から衝突される可能性もある。そのために、衝突可能性のある衝突点は、 $\mathbf{r}_i \Delta t + |\max(\mathbf{r}_\Omega)| \Delta t$ の区間について調べなければならない。ここで $|\max(\mathbf{r}_\Omega)| \Delta t$ は、全計算点中の最大速度からなる、他から衝突される可能性の見込み量である。

5.3.2 衝突の判定方法

このようにして見つけた衝突可能点同士が実際に衝突するかどうかの判定を行う。図 43 に示すように、布モデルの格子点を点 i とし、点 i は人体モデルのパッチ平面上の点 j に衝突するとする。点 j の法線ベクトル \mathbf{n}_j は、パッチ平面の法線ベクトルから計算できる。この \mathbf{n}_j と逆の方向に \mathbf{d}_ξ ととり、 \mathbf{d}_ξ 軸と \mathbf{r}_i ベクトルがなす平面上に \mathbf{d}_ξ 軸と直交する \mathbf{d}_η 軸をとる。点 i の速度 \mathbf{r}_i の \mathbf{d}_ξ 軸成分を a_i とし、点 j の速度 \mathbf{r}_j の \mathbf{d}_ξ 軸成分を a_j とする。

$$a_i = \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{d}_\xi \quad (61)$$

$$a_j = \mathbf{r}_j \cdot \mathbf{d}_\xi \quad (62)$$

点 i と点 j 間の ξ 方向の距離を l_{ij} とすると、

$(a_i - a_j) \Delta t \geq l_{ij}$ の時にだけ衝突が起る可能性があり、それ以外は衝突は起こらない。衝突が起こる可能性がある場合には、衝突の判定をテストベクトルと平面の交点計算で行う。

次に交点の計算方法について述べる。衣服と人体との衝突点の計算には、光線追跡法の交点計算方法が利用できる。今、衣服表面上の点の座標を \mathbf{r}_a とし、人体表面上の衝突点の座標を \mathbf{r}_b とする。衝突検査ベクトルはパラメータ \hat{t} を用いて、 $\mathbf{r}_a + (\mathbf{r}_b - \mathbf{r}_a) \hat{t}$ となる。 $\hat{t} = 0$ の時に衣服表面の格子点であり、 $\hat{t} = 1$ の時に人体表面の格子点になる。人体表面の法線ベクトルを \mathbf{n}_b とし、空間ベクトルを \mathbf{V} とすると、 \mathbf{n}_b に直交する平面は、

$$\mathbf{n}_b \cdot \mathbf{V} + D = 0 \quad (63)$$

で記述できる。この平面と衝突検査ベクトルとの交点は、パラメータ t^* で記述できる。

$$t^* = (\mathbf{n}_b \cdot \mathbf{r}_a + D) / (\mathbf{n}_b \cdot (\mathbf{r}_b - \mathbf{r}_a)) \quad (64)$$

となる。(64) 式の分母が零になるのは、衝突検査ベクトルと平面が完全に平行な

ときである。

5.3.3 衝突処理の計算方法

衝突による速度の変化の計算は、従来、布と布同士の衝突と、布と体の衝突に場合分けして計算されていた[85]。しかし、本来、衝突現象は衝突物や被衝突物が何であろうと、同一の物理法則に従うので、ここでは場合分けが不要な統一的な計算方法を提案する。

衝突が起こると図 43(A) に示す速度ベクトルの \mathbf{d}_ξ 成分 a_i, a_j は、運動量保存則と跳ね返り係数 ν により図 43(B) に示す b_i, b_j に変化する。

$$\mu_i a_i + \mu_j a_j = \mu_i b_i + \mu_j b_j \quad (65)$$

$$(b_i - b_j) / (a_i - a_j) = -\nu \quad (66)$$

ここで、 μ_i, μ_j は点 i と点 j が代表する質量である。以下の式より点 i についてのみ記述する。点 j についても点 i と同様である (添字の i と j を入れ換えればよい)。(65) 式 (66) 式より (67) 式が得られる。

$$b_i = (\mu_i - \nu \mu_j) a_i / (\mu_i + \mu_j) + (1 + \nu) \mu_j a_j / (\mu_i + \mu_j) \quad (67)$$

また、速度ベクトルの \mathbf{d}_η 軸成分を c_i, c_j とすると (68) 式になる。

$$c_i = \dot{\mathbf{r}}_i \cdot \mathbf{d}_\eta \quad (68)$$

速度ベクトルの \mathbf{d}_η 軸成分 c_i と c_j は、衝突後には d_i, d_j になる。

$$d_i = F(c_i, a_i) \quad (69)$$

ここで関数 $F(\)$ は、

$$\begin{aligned} \text{if } c_i > \rho a_i & \text{ then } F(c_i, a_i) = c_i - \rho a_i \\ \text{else } & F(c_i, a_i) = 0 \end{aligned} \quad (70)$$

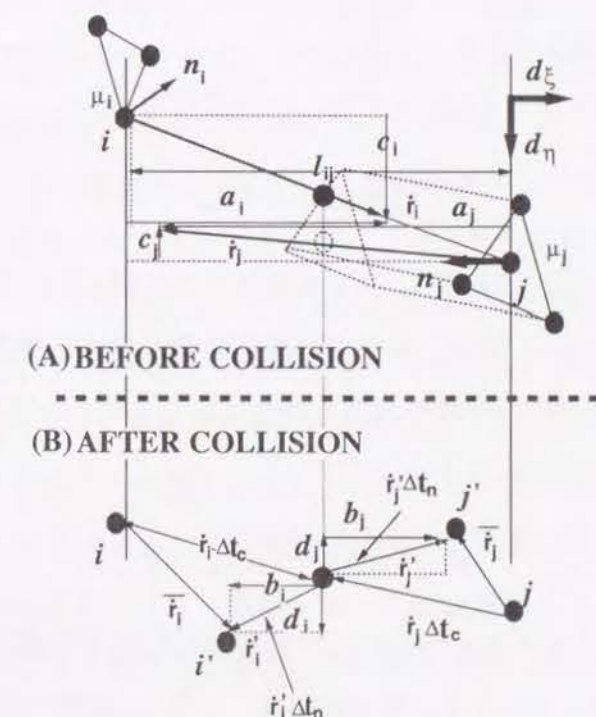


図 43: 衝突による速度変化

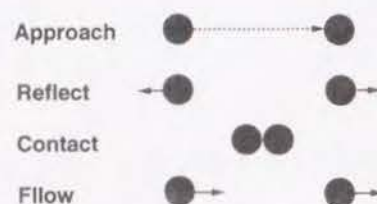


図 44: 衝突後の振舞い

であり ρ は静止摩擦係数である。

衝突後の速度ベクトルを $\dot{\mathbf{r}}'_i$ と $\dot{\mathbf{r}}'_j$ とすると (71) 式になる。

$$\dot{\mathbf{r}}'_i = b_i \mathbf{d}_\xi + d_i \mathbf{d}_\eta \quad (71)$$

衝突前の速度ベクトル $\dot{\mathbf{r}}_i$ が衝突により $\dot{\mathbf{r}}'_i$ に変化する (図 43(B) 参照)。点 i と点 j は、 $\Delta t_c = l_{ij}/(a_i + a_j)$ 時間、衝突前の速度で進んでから衝突する。衝突後は、 $\Delta t_n = \Delta t - \Delta t_c$ 時間だけ衝突後の速度で進む。点 i 、点 j は Δt 時間内に $\bar{\mathbf{r}}_i$ 、 $\bar{\mathbf{r}}_j$ の平均速度で移動したことになる。

$$\bar{\mathbf{r}}_i = (\dot{\mathbf{r}}_i \Delta t_c + \dot{\mathbf{r}}'_i \Delta t_n) / \Delta t \quad (72)$$

つまり、 $\dot{\mathbf{r}}_i$ の速度ベクトルをもつ点 i は Δt 時間後に $\bar{\mathbf{r}}_i \Delta t$ だけ離れた点 i' に移り、 $\dot{\mathbf{r}}'_i$ の速度ベクトルをもつことになる。衝突後の点 i 、点 j の振舞いは図 44 に示す三種類である。本手法では、点 i と点 j の質量と速度と跳ね返り係数、静止摩擦係数から、これら全ての振舞いを 3 次元空間で計算することができる。

5.4 物理モデルと幾何モデルを段階的に併用する衝突モデル

物理モデルと幾何モデルを段階的に併用する衝突モデルは、

1. 人体に近い距離にある衣服部分は、その衣服部分と人体部分とに対応関係があるとみなし、両者は瞬間的に同一の運動系に属すると考え、幾何モデルに

より、人体部分の動きを対応する衣服部分に直接的に伝達し、人体の動きに従って同じように動かす。

2. 次に、人体を静止したものと考え、物理モデルを使って、衣服から人体への衝突計算を行う。

となる。最初に幾何モデルを用いているので、人体と衣服との相対速度は非常に小さくなり、次に物理モデルを用いるので、衣服が人体に貼りつくこともない。このような理由から、幾何モデルと物理モデルの併用は、両方法の利点を生かし、欠点を補い合うことになるといえる。この衝突モデルでは、ボールが早い速度で、突然、衣服に衝突してくるような (つまり、運動系が同じでない) 場合の衝突には対応できないが、衣服をまとった人体が動くような場合には対応できる。

幾何モデルは、(1) 人体と衣服の対応関係の計算、(2) 人体の動きによる衣服対応点の座標移動、に分けられる。人体と衣服の対応点の計算では、まず、図 45(1) に示すように、布の質点位置から衣服の内側方向に、人体の単位時間あたりの最大移動距離に余裕分を加えた範囲を探索し、対応する人体の 3 角パッチを見つける。

次に、図 45(2) に示すように、衣服対応点の座標を対応する人体の 3 角パッチの単位時間中の移動距離に従って移動する。この処理を行うことで、図 45(3) に示すように、人体と対応を持つ衣服の部分の相対速度は衣服の変形分だけになり、十分に小さくなるため、物理モデルである、人体と衣服の衝突計算が可能になる。もちろん、人体が静止している場合には、人体の動きの伝達処理を行う必要はない。また、人体と衣服の対応点の計算も、動きのある人体部分のみを計算対象にすればよい。この人体と衣服の相対速度を小さくする幾何モデルの適用の後に、衣服と人体の衝突、衣服の自己衝突の計算からなる物理モデルの適用を行う。この時、人体動作の伝達によって人体の動きの影響は、すでに布の動きに反映されているので、図 45(3) の段階の衣服と人体との衝突計算では、人体の動きがないものとして扱うことができる。

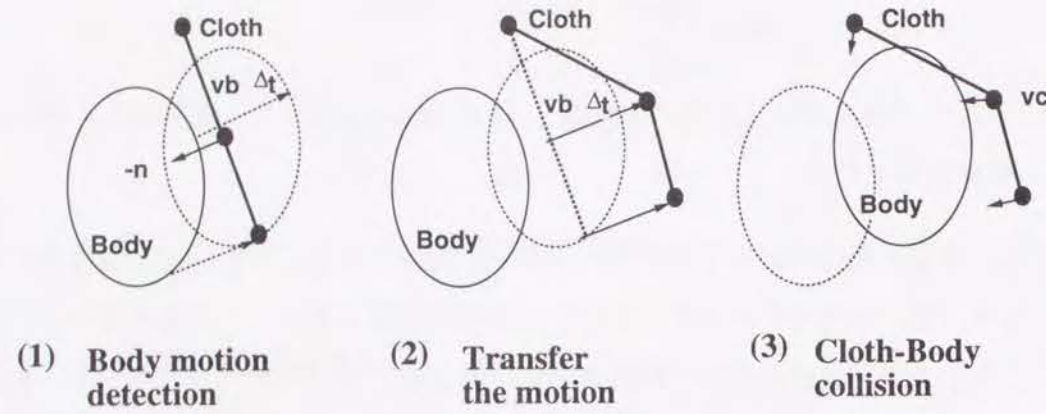


図 45: 物理モデルと幾何モデルを段階的に併用する衝突モデル

5.5 人体の動きに対応する衣服形状計算法

幾何モデルと物理モデルを段階的に併用する衝突モデルでは、幾何モデルによる衝突力 (\mathbf{F}^{bdy}) と物理モデルによる衝突力 (\mathbf{F}^{col}) が発生する。また、衣服形状計算には、衣服の形状保持力 (\mathbf{F}^{shp}) と布の曲げ回復力 (\mathbf{F}^{bnd}) も考慮しなければならない。ここで、衝突力 (\mathbf{F}^{bdy} , \mathbf{F}^{col}) と形状保持力 (\mathbf{F}^{shp}) は、人体の動きや無制約時の衣服の運動が与えられたときに、その運動に与える影響から計算できる衣服形状の制約力である。これらの制約力を含む衣服の運動は、正則化パラメータ (λ) を使って (73) 式の運動方程式で記述できる。

$$\mu \ddot{\mathbf{r}} + (c^{air} + c^{fric}) \dot{\mathbf{r}} + \lambda_1 \mathbf{F}^{shp}(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}) + \mathbf{F}^{bnd}(\mathbf{r}) + \lambda_2 \mathbf{F}^{col}(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}) = \mathbf{F}^{ext}(\mathbf{r}) + \lambda_3 \mathbf{F}^{bdy}(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}) \quad (73)$$

ここで、 \mathbf{r} はユークリッド座標系の座標値であり、衣服を構成する布を格子状に分割した時の格子点を示す。また、 μ は格子点が代表する質量であり、 c^{air} , c^{fric} は空気抵抗、布摩擦の係数である。 \mathbf{F}^{ext} は外部力を示す。

(73) 式を解くには、まず、 $\lambda = 0$ として無制約時の運動を求め、順次、制約の影響を取り込めばよい。このような解き方は、解の近似精度を段階的に上げていくことに相当する。以下に、このアルゴリズムを説明していく。

1. (73) 式で $\lambda = 0$ とし、初期値 ($\mathbf{r}_{(0)}, \dot{\mathbf{r}}_{(0)}$) で、(74) 式の運動方程式を解き一次近似速度 ($\dot{\mathbf{r}}_{(1)}$) を計算する。ここで下添字 (N) は、その変数が N 次近似であることを示し、一次近似速度 ($\dot{\mathbf{r}}_{(1)}$) は、無制約時の格子点の運動になる。

$$\dot{\mathbf{r}}_{(1)} : \mu \ddot{\mathbf{r}} + (c^{air} + c^{fric}) \dot{\mathbf{r}} + \mathbf{F}^{bnd}(\mathbf{r}_{(0)}) = \mathbf{F}^{ext}(\mathbf{r}_{(0)}) \quad (74)$$

2. $\dot{\mathbf{r}}_{(1)}$ の方向に、衣服部分から対応する人体部分を探し、対応する人体部分の速度 ($\dot{\mathbf{r}}^{bdy}$) を一次近似速度に加え、二次近似速度 ($\dot{\mathbf{r}}_{(2)}$) とする。これにより、 $\lambda_3 \mathbf{F}^{bdy}(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}})$ の制約力が計算できたことになる。

$$\dot{\mathbf{r}}_{(2)} = \dot{\mathbf{r}}_{(1)} + \dot{\mathbf{r}}^{bdy} \quad (75)$$

3. $\dot{\mathbf{r}}_{(2)}$ と $\mathbf{r}_{(1)} = \mathbf{r}_{(0)} + \dot{\mathbf{r}}_{(2)} \Delta t$ を用いて、布形状保持の制約を満たす $\dot{\mathbf{r}}_{(3)}$ を求める。

$$\dot{\mathbf{r}}_{(3)} : \sum_{\Omega} (l_a^0 (\epsilon_a - \bar{\epsilon}_a))^2 = 0 \quad (76)$$

ここで、 l_a は、 $\dot{\mathbf{r}}_{(2)}$ と $\mathbf{r}_{(1)}$ から計算される i 点と a 点間の距離 ($l_a = |\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_i|$) であり、 l_a^0 は、 $t = 0$ 時の初期的距離 ($l_a^0 = |\mathbf{r}_a(0) - \mathbf{r}_i(0)|$) である。また、 ψ_a は布の引張り特性を示し、 \mathbf{F}_a^{int} は i 点と a 点間の内力である [1]。これにより、 $\lambda_1 \mathbf{F}^{shp}(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}})$ の制約力が計算できたことになる。

4. ($\mathbf{r}_{(1)}, \dot{\mathbf{r}}_{(3)}$) を用いて布と人体、布同士の衝突の制約を満たす $\dot{\mathbf{r}}_{(4)}$ を求める。

$$\dot{\mathbf{r}}_{(4)} : \mathbf{F}^{col}(\mathbf{r}_{(1)}, \dot{\mathbf{r}}_{(3)}) = 0 \quad (77)$$

ここで \mathbf{F}^{col} は衝突処理の関数である [4]。これにより、 $\lambda_2 \mathbf{F}^{col}(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}})$ の制約力が計算できたことになる。

5. ($\mathbf{r}_{(1)}, \dot{\mathbf{r}}_{(4)}$) を用いて、(78) 式で布形状の更新を行い $\mathbf{r}_{(2)}$ とする。

$$\mathbf{r}_{(2)} = \mathbf{r}_{(1)} + \dot{\mathbf{r}}_{(4)} \Delta t \quad (78)$$

6. $(\mathbf{r}_{(2)}, \dot{\mathbf{r}}_{(4)})$ を新たな初期値 $(\mathbf{r}_{(0)}, \dot{\mathbf{r}}_{(0)})$ として 1. に戻る.

$$\mathbf{r}_{(0)} \quad : \quad \mathbf{r}_{(2)} \rightarrow \mathbf{r}_{(0)} \quad (79)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_{(0)} \quad : \quad \dot{\mathbf{r}}_{(3)} \rightarrow \dot{\mathbf{r}}_{(0)} \quad (80)$$

5.6 計算実験

本章で述べた衝突の計算モデルの有効性を確認するために、衣服を人体モデルに動的に着せつける実験を行った。平均速度ベクトル方向の衝突計算は、平均速度ベクトルの修正の都度に行うのが理想的ではあるが、計算コストが高くなり、計算時間の点で実用的ではない。計算実験では、 Δt の間に 30 回程度の平均速度ベクトルの反復修正計算の後に衝突計算を 1 度行い、この処理を 2 度繰り返す。

ワンピースの形状計算

8 枚の型紙からなる、婦人用ワンピースの立体形状を算出する実験を行った。型紙は、アパレル CAD のデータを用い、型紙から縫いしろの部分を取り除き、裏地は省略した。ワンピースは、全部で 2704 点の格子点に分割してある。人体モデルは 1256 個の 3 角パッチから構成されている。

図 46 にワンピースの型紙を格子に分割した結果の一例を示す。

このような型紙と人体モデルから、立体的な衣服形状を計算する。布の力学特性には綿布の引張り特性と曲げ回復特性を用いる。現実的には、型紙から衣服を縫製した後に人体に着せつける手順をとるべきであるが、衣服を人体に着せつける作業を計算機で自動的に行うには、着せつけのシーケンスの設定など、まだ問題が残っている。対話的に着せつけるにしても、現状では計算速度の点で困難である。今回は、図 47 に示すように各型紙が人体を挟み込むように配置した後、バネの力で型紙が互いに引き寄せられるようにし、バネの長さが閾値以下になったとき、双方の型紙を縫製する。このような着せつけは、人体が比較的単純なポーズをとっている

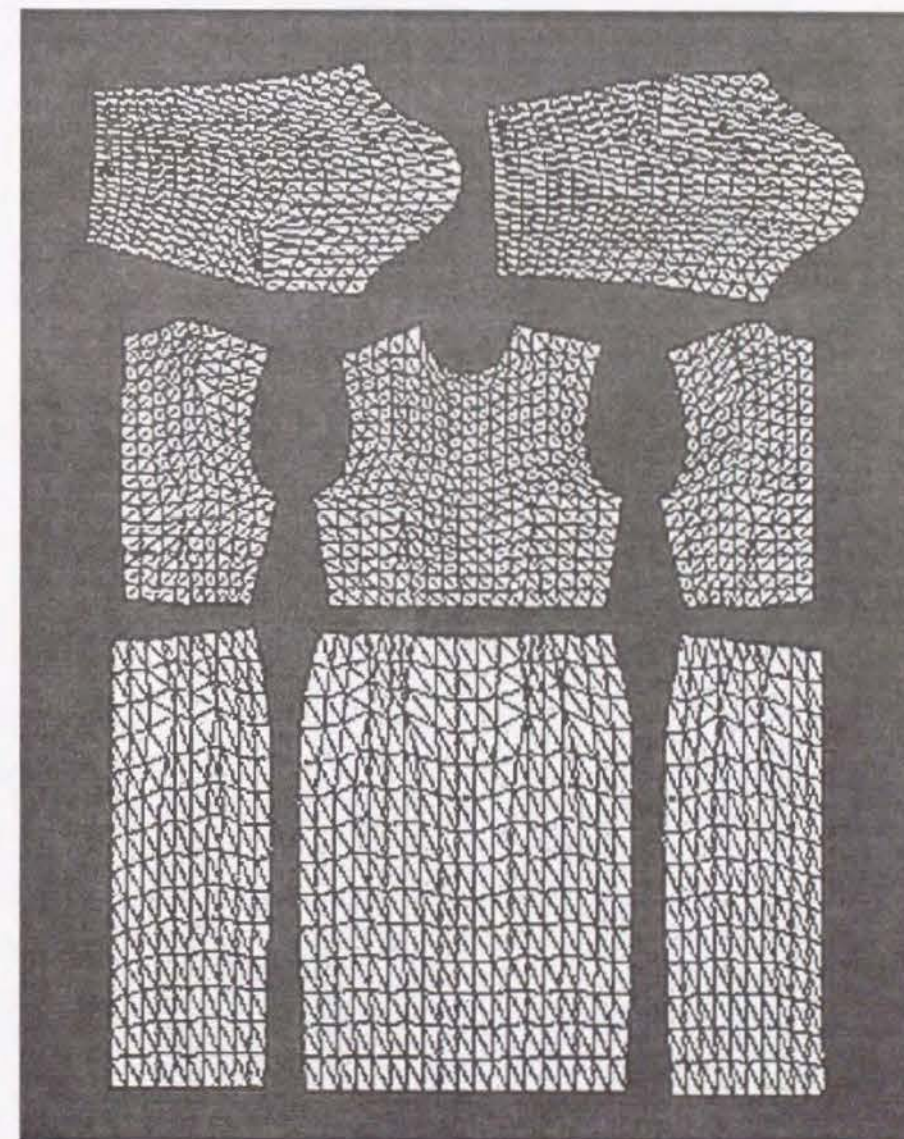


図 46: ワンピース型紙の格子

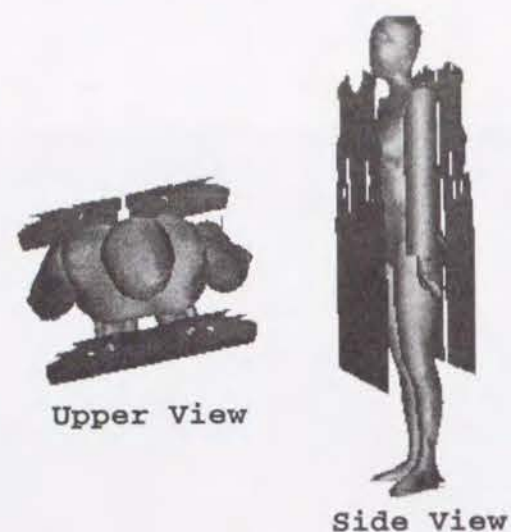


図 47: 型紙の初期配置

場合に有効な方法である。バネの収縮が終わらないうちに衣服が落下するのを防ぐために、重力は全てのバネが連結された直後から作用するようにし、0.01 秒の単位時間間隔で 1 秒間の動きを計算した。摩擦係数は 0.3 とし、跳ね返り係数は 0.1 とした。SGI 社の Indigo²(CPU:R4000-100MHz) を使って約 15 分の計算時間であった。

図 48 に、実測の距離画像から作成した 3 次元形状と本手法による衣服形状計算結果の比較を示す。図 48(A) は実際のワンピース着装時の写真であり、図 48(B) は、その時の 3 次元計測結果を陰影表示したものである。図 48(C) は計算結果を陰影表示したものである。比較を容易にするために (B) の 3 次元計測結果は (C) の格子点数と等しくなるようにサンプリングした。

また、図 49 に異なる布力学特性を用いた時の結果を示す。用いた布は、綿、ポリエステル、羊毛である。この中ではポリエステルが最も柔軟であり、羊毛が最も張りがある特性を持っている。計算結果にも、スカートのドレープ部分にそのような傾向が見られる。

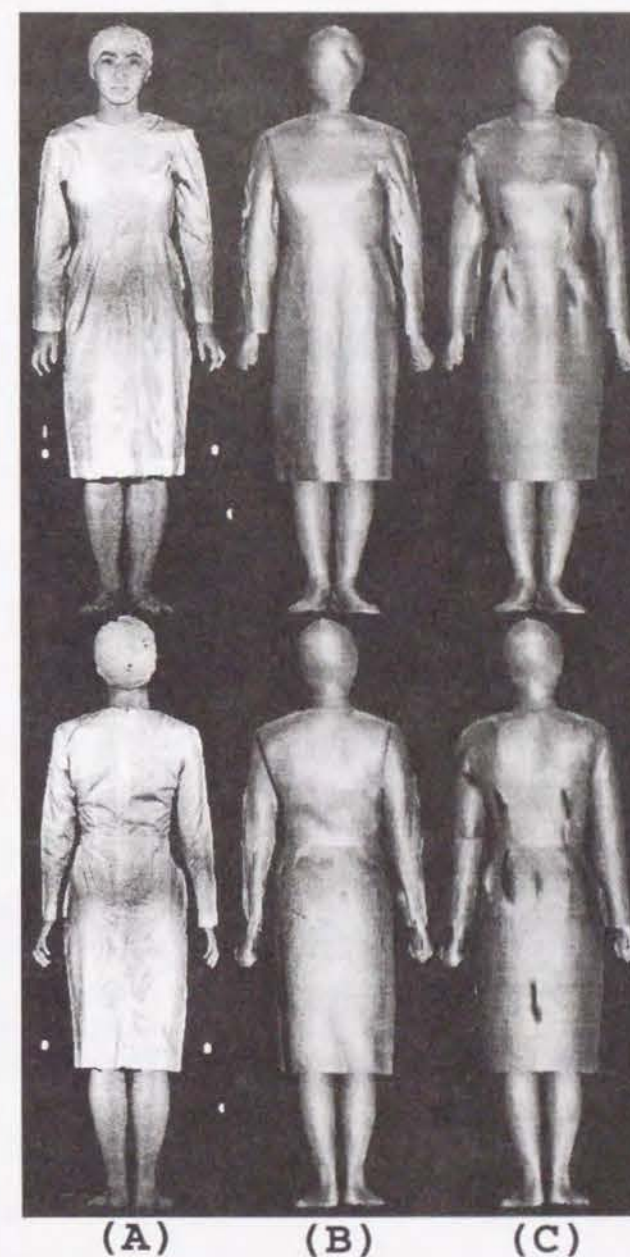


図 48: 実測形状と計算結果の比較

- (A) 写真
- (B) 測定結果
- (C) 計算結果

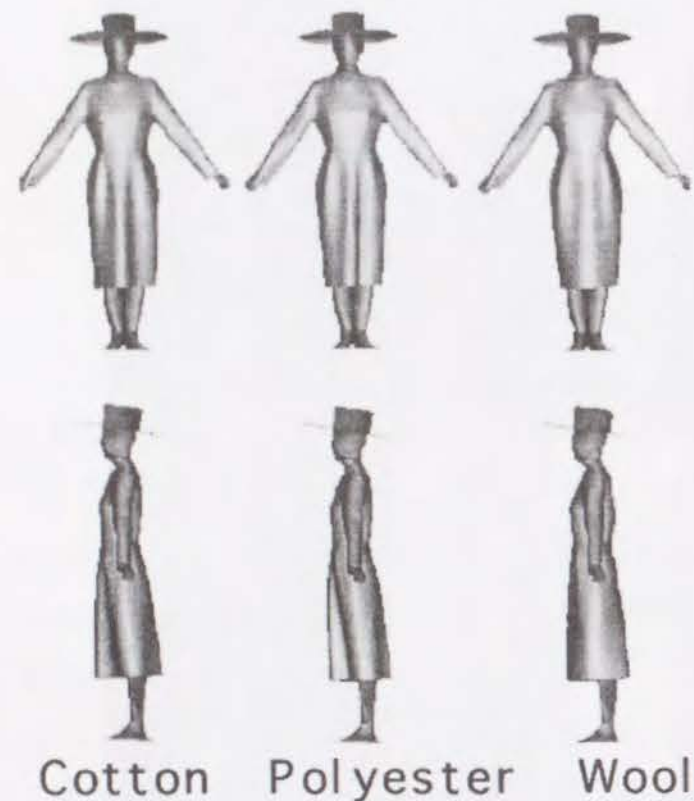


図 49: 異なる布特性を用いた結果

半透過的衝突処理

人体が衣服を着たときには、衣服の一部が裏返ることがない限り、衣服の裏地側が人体と接触する。そこで、人体表面の法線と衣服表面の法線とを比較し、方向が同じならば衝突処理を行い、逆ならば衝突処理を行わないようにする。こうすると、衣服が人体に対して半透過的になるので、人体に衣服を着せつける作業が簡単になる。すなわち、人体の回りに型紙を配置して、人体を包み込むような縫製を行わず、人体に衣服を着せつけることができる。衣服だけで縫製を行い、できあがった衣服を人体に接近させれば、衣服の表側と人体が接触しても衝突は起こらないために、衣服は人体を擦り抜け、衣服の裏地と人体が接触したときに衝突が起こるために、着せつけができる。

実験では、型紙を人体前部に配置し、無重力状態で型紙を人体に押しつけるような力を加えた。そして、ほぼ透過が完了した時点で、押しつける力をなくし重力を作用させた。図 50 に、衣服が人体を半透過的に擦り抜け、衣服の着せつけができあがる状況を示す。このような、非現実的な状況を簡単に作り上げられることが、仮想服飾環境の特徴であるといえる。半透過的な着せつけでは、縫合が瞬時に行われ、衝突も布の片面でしか起こらないために衝突処理が減り、計算時間も約 10 分と早くなる。

人体が動く場合の衣服の動的形状計算

本章で述べた衝突モデルと衣服形状計算方法の有効性を確認するために、衣服を人体に着せつけた後、人体に歩行動作を与え、衣服形状の変形を計算した。実験に用いた人体モデルは 17 個の部分に分かれている。この 17 個の部分を木構造に連結し、3 軸方向に回転できるようにした。もちろん、木構造の下位部分は上位部分の回転の影響を受ける。

次に、実際の人体の歩行シーンをビデオに撮影し、その中の 6 秒間のシーンか

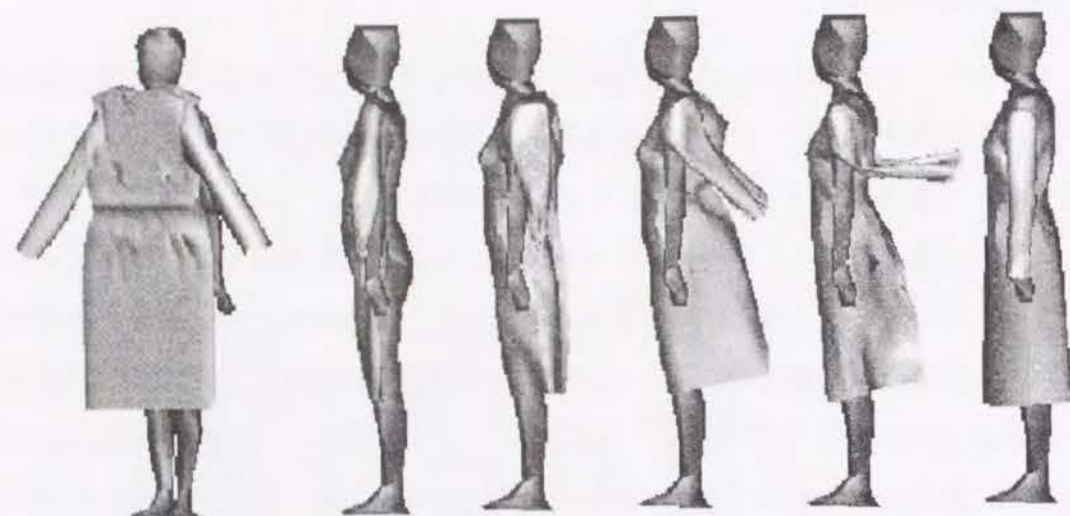


図 50: 半透過的な着せつけ

ら等間隔に 20 フレームを取り出し、このフレーム全てに対して、ビデオ画像中の人体と重なるように人体モデルの各関節角度を操作してキーフレームを作成した。さらに、このキーフレームを基に 0.01 秒間隔の動作を線型補間により作成した。

衣服として、8 枚の型紙から構成される婦人用ワンピースを、文献 [4] の方法で直立した人体に着せ付けた後、人体に歩行動作を与えた。衣服には、綿布の特性（自重、曲げ特性）を与え、計算時間を少なくするために、衣服の自己衝突計算は省いた。計算時間は、単位時間間隔 ($\Delta t = 0.01 \text{ sec}$) に設定して、実時間 6 秒間の計算に 4 時間を要した。

図 51(A) に歩行動作を与える前の人体の着装状態を、図 51(B) に歩行時の人体の着装状態を示す。この実験では、人体と衣服の対応計算に、人体の単位時間あたりの移動距離に余裕分 (7cm) を加えた範囲を探索している。この余裕分の値は、衣服の袖の動きが、人体の腕の動きに追従しやすいように経験的に設定した値である。図 5.6 に従来法（幾何的衝突処理のみ、物理的衝突処理のみ）と提案手法の比較を示す。 $\Delta t = 0.01$ に設定すると、物理衝突計算だけでは衝突検出洩れが発生



(A) 歩行動作前

(B) 歩行中

図 51: 歩行動作前と歩行中の着装状態

するが、提案手法では衝突検出洩れが発生していない。この場合、 $\Delta t = 0.001$ 程度にすれば物理衝突計算だけでも衝突検出洩れをなくすことはできるが、計算に 10 倍の時間がかかる。また、幾何的衝突処理のみではスカートのすそが体と同じ動きになるが、提案手法では体の動きに従って揺動するため、よりリアルに見える。図 53(A) には、実際の人体の歩行シーンのビデオ画像を、図 53(B) に関節角度を操作した人体モデルを、図 53(C) に、直立の姿勢で衣服を着た人体に歩行動作を与えた時の計算結果を示す。また、図 54 に、その時の連続表示例を示す。

この計算結果をアニメーションで表示し、繊維の専門家に見せたところ、全体的に歩行時の衣服の動きを表現できていると判定された。

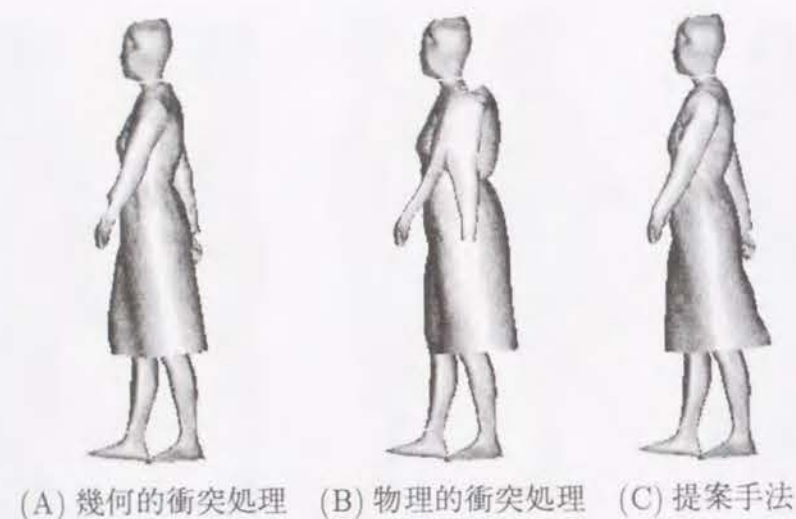


図 52: 従来法との比較
($\Delta t = 0.01 \text{ sec}$, $t = 0.15 \text{ sec}$)

5.7 考察

図 48 からわかるように、スカート前部のドレープの位置が実測モデルと多少違うが、これは主に実際の衣服の縫製に起因している。ドレープは、長さの異なる部分同士を縫製することで発生する。この時の縫製が完全に均質であれば、ドレープは必ず縫製部分の中央に出現する。計算では、理想的な縫製が実現されているためにドレープが中央に出現しているが、全体的にはよく似ており、良好な形状計算ができていると言える。

ボタンナ 3 名の評価では、計算の方が型紙からできるべき衣服形状を正しくあらわしているという結果を得た。これは、手作業による縫製では、細かな縫い方の不均一さは避けられないために、実物では型紙からは予期できないしわが現れたためである。計算の方が理想的な縫製ができるために、型紙の情報を直接的に表現できたと考えられる。

また、計算結果をアニメーション表示して観察したところ、布が人体表面を滑り

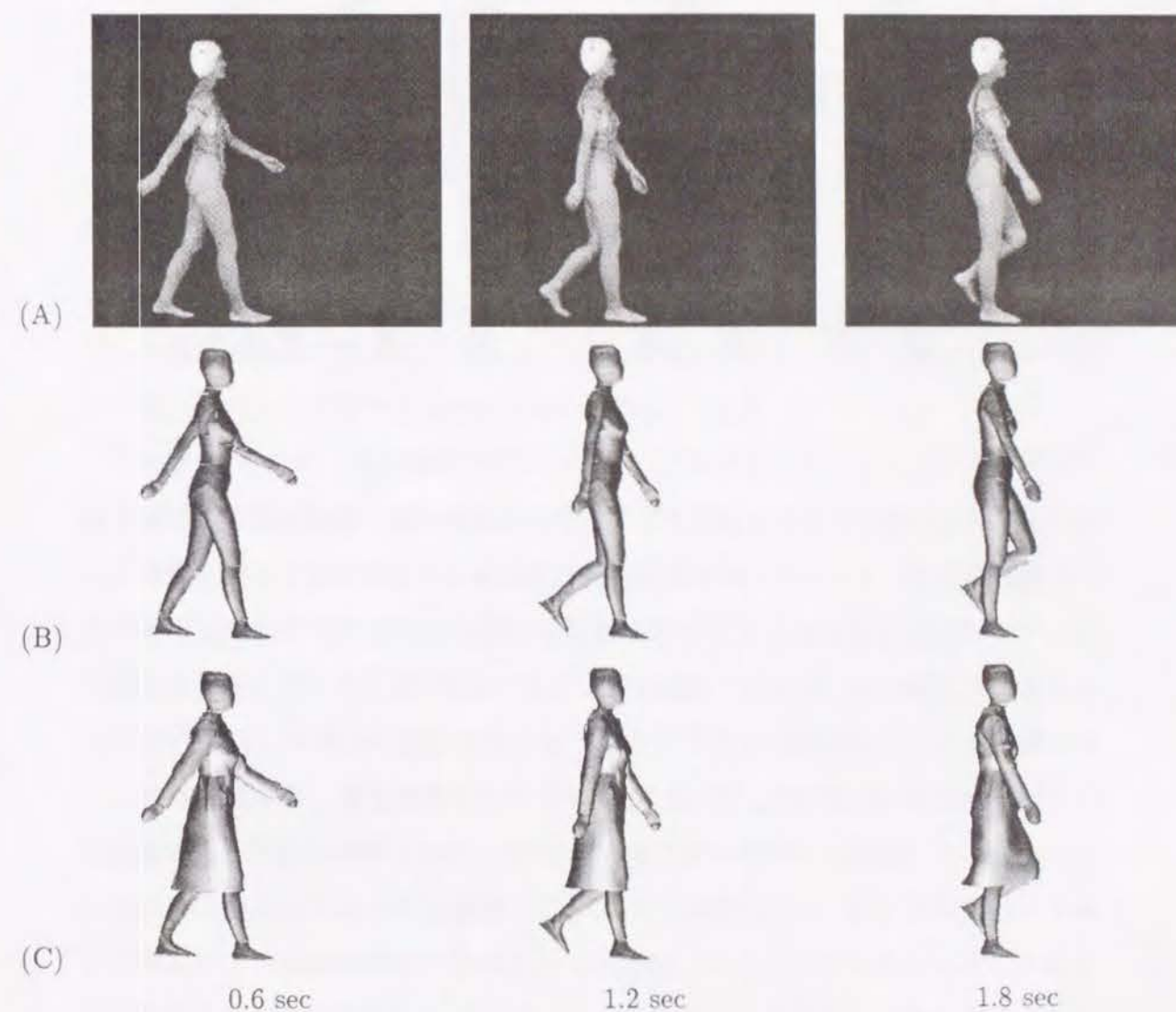


図 53: 歩行シーンの計算例
(A) 歩行シーンのビデオ画像
(B) 関節角度を操作した人体モデル
(C) 衣服を着た人体モデル

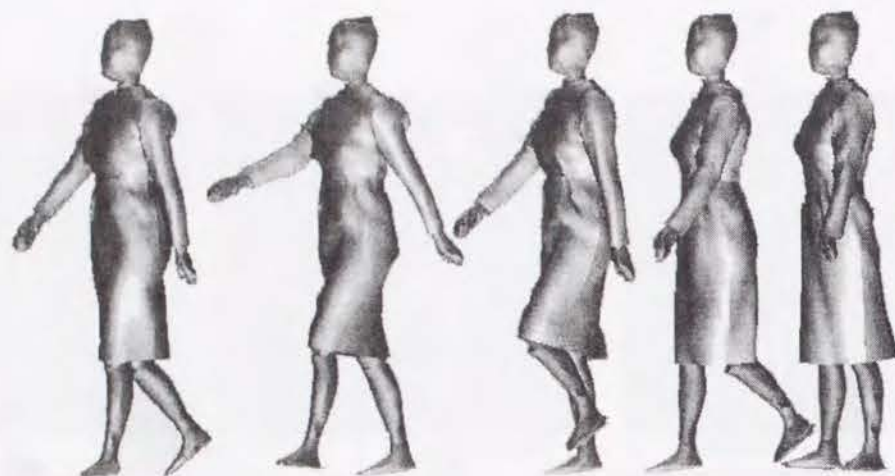


図 54: 歩行シーンの連続表示

落ちるような状況がリアルに表現できていた。パラメータ（摩擦係数や跳ね返り係数の値）の設定によっては、布が人体表面で跳ねるような状況や、布がまとわりつくような状況も表現できた。しかしながら、実際に人体と布の間の弾性係数を測定することは難しい。今後は、実際の布と人体の衝突の様子に合致する計算結果が得られるように、各係数を決定する方法を確立する必要がある。

また、人体の動きに対応して衣服が変形する状況を数値計算できるようになった。幾何モデルは、時間的にマクロな視点からの方法であり、時間的にミクロな視点からの方法である物理モデルと併用することで、衣服形状計算を時間的にマクロに進めることができるようになる。幾何モデルと物理モデルを段階的に併用することで、物理モデルだけを用いた場合と比較して、約10倍程度大きな単位時間を設定しても、正しい衝突計算ができるようになった。

しかし、幾何モデルでは、人体と衣服の対応計算が必要になるが、人体とどのような関係にある衣服部分が人体と同一運動系に属するか、の客観的な判断基準が得られていない。現状では、人体の単位時間あたりの移動距離に余裕分を加えた範囲を探索し、人体と衣服の対応を計算している。しかし、この余裕分の値は、

人体の動きによって変動する可能性もあるので、自動的に設定するようにしていく必要がある。

また、今回は人体に動作を与える作業を人手に頼ったが、非常に時間がかかる作業になるので、今後は、モーションキャプチャや姿勢推定法[55]などの方法で、この作業を自動化していきたい。

5.8 結言

衣服の数値計算における、動的に変形する衣服と人体との衝突を、摩擦と跳ね返りの影響をも含んだ制約条件とみなした制約充足型アプローチによる衝突の影響の計算方法について述べた。

本章では、人体と布の衝突を取り上げ、布が肌を滑り落ちるような状況が計算できるように、摩擦と跳ね返りを考慮した定式化を行った。これにより、従来からの斥力のような仮想的な力を導入した衝突計算を行うことなく、布表面の荒さに関係する布の摩擦係数や弾性係数の特性値に基づく衝突計算が可能になった。

また、動的に変形する衣服と動く人体との衝突モデルと、人体の動きに応じて衣服形状が変形していく状況の数値計算法について述べた。幾何モデルと物理モデルを段階的に併用する衝突モデルを用いれば、人体が動く場合の衣服形状計算に有効である。この衝突モデルは、物理モデルと幾何モデルの利点を生かし、欠点を補い合うものである。計算実験により、衣服を着装した人体の歩行シーンを計算できることを確かめた。

6 仮想服飾環境の応用

6.1 緒言

ここまでで、仮想服飾環境を構成する要素技術（布の計算モデル、格子形成、衝突の計算モデル）について述べてきた。仮想服飾環境は、第1章で述べたように、服飾に関する仮想現実世界を構築することが目標である。それゆえ、リアルタイムな計算が望ましい。しかし、現時点のCPU速度ではリアルタイムな計算は不可能である。そこで、リアルタイム性は犠牲にしても、インタラクティブな操作を中間的な目標にする。もちろん、インタラクティブな操作にも、リアルタイムな応答性は重要であるが、ここでは、操作者の入力に対応した応答があることを目標とする。これまでの実験が、全てバッチ処理であったことを考えると、操作者の要求を満たす結果を作り出すことができるようになる。操作性は、計算機の計算速度が向上していくにつれ、また、専用ハードウェアが開発されるにつれ向上していき、応答速度はリアルタイムに近づいていくと考える。

6.2 仮想試着システム

仮想服飾環境の応用例として、仮想試着システムを取り上げる。仮想試着システムとは、自分が衣服を試着したときの姿を計算により作り出すシステムである。入力には、自分の姿が写っている画像と、自分が試着してみたい衣服の情報である。自分の姿が写っている画像は、体のシルエットがはっきりとしている水着姿などが望ましい。出力は、その衣服を試着したときの自分の姿が写った画像である。このような試着システムを使えば、カタログショッピングなどで選択した衣服を試着したときの姿を見ることができるために、購入後にサイズが合わない、自分には似合わない等のトラブルを事前に回避できると考えられる。このような仮想試着システムは、将来のカタログショッピングには、不可欠のものになってゆくと考える。

仮想試着システムの仕組みを順を追って説明していく。

1. 自分の姿が写っている入力画像をもとに、標準姿勢の人体モデルの姿勢を徐々に変えていき、入力画像中の人物とシルエットが重なるようにする。
2. その時の人体モデルの動きを、衣服を着た状態の人体モデルに与え、衣服形状計算を行う。
3. 人体モデルの動きが止まり、衣服形状計算が終了した後、計算で得られる衣服画像と、自分の姿が写っている入力画像とをスーパーインポーズする。
4. さらに、衣服からはみだした人体部分などを消去することで、合成画像を生成する。

自分の姿が写っている入力画像と計算で得られる衣服画像とを合成することで、表現力が飛躍的に向上する。これは、写真という現実世界とシミュレーションという仮想世界との合成（拡張現実）である。特に人物の顔の表情や、髪の毛などはグラフィックスで作成することは難しく、また、背景もデータ量が多いために制作に時間がかかる。このような理由から、拡張現実による表現は、手軽に高品質の画像を生成することのできる技術として広く利用されていくことと思われる。

6.3 計算実験

計算実験として、図 55(A) に示すような水着姿の女性の画像を入力画像として用いる。図 55(B) に、人体モデルを動かし、入力画像の人物のシルエットと重なるようにする。この時の人体モデルの動きは、逐次、衣服形状計算に伝達され、衣服を着た人体モデルが動いていく。この実験では、前述の Indigo2 を用いて、人体モデルの動きを伝達し、衣服形状計算が 0.01 秒分進むのに約 30 秒かかっている。図 55(C) に、衣服を着た人体モデルに動きを与え終わった時の結果を示す。さらに、この図の衣服の部分だけを取り出し、入力画像と合成した結果を図 55(D) に示す。



(A) 人物の写真



(B) 動きの生成



(C) 衣服計算



(D) 合成

図 55: 写真との合成例

6.4 考察

今回の実験では、光源の位置や照度、カメラパラメータ等には特別の注意を払っていないにもかかわらず、試着した時の様子が表現されているように思われる。衣服にテクスチャマッピングや細かなしわのバンプマッピングを施したり、光源やカメラについての情報を付加することで、さらにリアルな画像が生成できると思われる。

また、今回は、入力画像中の人物のシルエットと人体モデルのシルエットとを重ね、人体モデルの動きを作る過程と、スーパーインポーズによる画像合成過程は人手によった。しかし、計算による自動化も可能であると思われる [55]。光源推定やカメラパラメータ推定も、適切な仮定を設定したり、入力画像を限定することで可能になると思われる。

6.5 結言

仮想服飾環境の応用例の一つとして、仮想試着システムについて述べた。水着の女性の入力画像をもとに、試着画像を生成する実験を行った。仮想試着システムは、拡張現実の技術を利用することにより、リアルな試着画像を生成できる可能性があることを確認することができた。このような仮想試着システムは、計算速度が向上し、リアルタイム計算が可能になれば、第1章図1に示したような、魔法の鏡として使うことができると思われる。

7 結論

本論文では、筆者が行ってきた布の力学的特性を用いた衣服形状の動的計算方法について述べた。第1章で、服飾における生活者と供給側の問題について述べ、研究の理念、及び、論文の構成について述べた。第2章で、仮想服飾環境の概要について述べ、研究の動機について述べる。また、仮想服飾環境の構成について述べ、従来の研究を概観し、本論文の位置づけを明確にした。本論文の特徴は、制約充足型アプローチで、相互作用型粒子の動的な振る舞いを扱うところにある。特に、実際の布の力学的特性を直接的に取り込むことができる特長がある。第3章では、布の計算モデルについて述べ数値計算実験を行った。ここで提案する布モデルは、制約充足型の動的モデルであり、非線形な布特性を直接的に計算に取り込み、その動きを計算することができる。制約充足型の動的モデルでは、計算に必要な記憶領域が少なく、また、計算精度と計算速度のトレードオフができるために、利用目的に合った計算形態が選べる。第4章では、要素分割に必要な格子形成について述べ、型紙と人体モデルを作成した。この格子形成方法は、滑らかさ、せん断角度、格子点間隔を制約としている。これらの制約は、格子化しようとする対象物が2次元の型紙でも、3次元の人体形状でも共通に適用することができる。第5章では、布と人体、及び、布同士の衝突の計算モデルについて述べ、ワンピースを人体に着せ付ける数値計算実験を行った。制約充足型モデルでは、衝突の影響も単に制約が1つ増えただけのこととしてモデルに取り込むことができる。衝突時に影響を与える摩擦、跳ね返りも考慮した衝突計算方法について述べた。さらに、幾何モデルと物理モデルを併用する衝突モデルについても述べ、人体が動く場合でも効率よく衝突を計算できることを示した。第6章では、仮想服飾環境の応用例として仮想試着システムについて述べた。仮想試着システムでは、1枚の人物写真に、計算で作出した衣服を着せ付けることができることを示した。

以上述べたように、本論文の研究成果は衣服の動的な形状計算に関する全般的な

ものであり、そのほとんどが制約充足型アプローチによって統一されている。そして、布特性を取り込んだ布モデル、型紙形状から着装形状計算までの一連のパスを示している。この研究成果を基に、近年中に実用的な服飾計算システムが完成すると確信している。

[謝辞]

研究の機会を与えて下さり、終始御懇切な御指導、御鞭撻を賜りました、京都大学工学部情報工学教室 池田克夫教授には衷心から感謝致します。常に適切な御指導を賜りました、京都大学工学部高度情報開発実験施設 美濃導彦教授には深く感謝致します。

研究の発表を許可していただいた東洋紡績（株）駒形秀樹取締役様に感謝致します。また、厳しくご指導頂いた、東洋紡績総合研究所原田研究室 原田隆司室長に感謝致します。

京都大学工学部高度情報開発実験施設 亀田能成助手の協力に感謝します。京都大学工学部情報工学科池田研究室、京都大学工学部高度情報開発実験施設美濃研究室の皆様の協力に感謝致します。

貴重な文献を提供していただき、助言をいただいた奈良女子大学生活環境学部 今岡春樹助教授、京都工芸繊維大学繊維学部 松尾達樹教授に感謝致します。

[関連発表]

[関連発表]

＜学会論文誌・学術雑誌＞

- [1] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, “仮想服飾環境 PARTY —動的変形可能な布のための数値計算方法—,” 電子情報通信学会誌, **J77-D-II**, 5, pp.912-921 (1994).
- [2] Sakaguchi Y, Minoh M, Ikeda K, “PARTY: A Numerical Calculation Method for a Dynamically Deformable Cloth Model,” System and Computers in Japan, **26**, 8, pp. 75-87 (1995).
- [3] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, “仮想服飾環境 PARTY —人体と型紙のための幾何学的制約充足型格子形成法—,” 電子通信学会論文誌, **J77-D-II**, 11, pp. 2210-2219 (1994).
- [4] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, “仮想服飾環境 PARTY —衣服形状計算における, 衣服と人体との衝突計算方法—,” 電子通信学会論文誌, **J78-D-II**, 3, pp. 483-491 (1995).
- [5] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, “仮想服飾環境 PARTY —人体が動く場合の衣服形状計算法—,” 電子通信学会論文誌, **J79-D-II**, 10, pp. 1712-1718 (1996).
- [6] 坂口 嘉之, 原田 隆司, “仮想服飾環境 PARTY —バーチャルリアリティと服飾環境—,” 繊維機械学会誌, **49**, 7, pp. P360-P368 (1996).

＜国際会議＞

- [7] Sakaguchi Y, Minoh M, Ikeda K, Yamada Y, "PARTY: Collision Calculation of Dress and Human Body," International Symposium on Fiber Science and Technology(ISF'94), 272F02Pa, pp.493 (1994).

＜大会・研究会等＞

- [8] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, "圧力エネルギーを持つ SNAKES," 1990 年電子情報通信学会春期全国大会, D-523, pp. 7-275 (1990).
- [9] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, "SNAKES パラメータの設定についての検討," 信学技報, PRU90-21, pp. 43-49 (1990).
- [10] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, "ニューラルネットワークによる輪郭線図形の形状識別," 情報処理学会第 40 回 (平成 2 年前期) 全国大会, 4C-5, pp. 157-158 (1989).
- [11] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, "ニューラルネットワークによる濃淡対象物の識別," 情報処理学会第 41 回 (平成 2 年後期) 全国大会, 3M-6, pp. 2-166-2-167 (1989).
- [12] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, "着装シミュレーションのための型紙要素分割法," 1991 年電子情報通信学会春期全国大会, pp. 7-365 (1991).
- [13] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, "衣服の動的シミュレーション," 情報処理学会第 43 回全国大会, 7B-5 (1991).
- [14] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, "仮想服飾環境 PARTY(I) —動的変形可能な衣服の形状モデラー," 信学技報, PRU91-91, pp. 25-32 (1991).

- [15] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, "仮想服飾環境 PARTY —型紙と人体形状からの格子形成法—," 信学技報, PRU92-81, pp. 25-32 (1992).
- [16] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, "仮想服飾環境 PARTY —動的変形可能な布のモデルと数値計算手法—," CG シンポジウム'92, 9, pp. 11-20 (1992).
- [17] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, "仮想服飾環境 PARTY —ワンピースの形状計算—," 1993 年第 24 回画像工学コンファレンス, 8-6, pp.269-272 (1993).
- [18] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, "仮想服飾環境 PARTY —衣服の動的形状計算における問題点—," 繊維学会シンポジウム予稿集, pp. E-69 (1993).
- [19] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, "仮想服飾環境 PARTY —衣服と人体との衝突計算—," 繊維学会シンポジウム予稿集, 2C16, pp. S-113 (1994).
- [20] 坂口 嘉之, 原田 隆司, 美濃 導彦, 池田 克夫, "仮想服飾環境 PARTY —人体歩行時における衣服形状計算法—," 繊維機械学会年次大会, 404-8, pp.128-129 (1996).
- [21] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, "仮想服飾環境 PARTY —服飾計算の現状と展望—," 画像ラボ, pp. 52-55, 7 (1993).
- [22] 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫, "仮想服飾環境 PARTY —衣服の着装形状計算—," 画像ラボ, pp. 53-56, 7 (1995).

[共著によるもの]

＜学会論文誌・学術雑誌＞

- [23] 天野 晃, 美濃 導彦, 池田 克夫, 坂口 嘉之, "サンプル輪郭モデルを利用した

Snakes,” 電子情報通信学会誌, **J76-D-II**, 6, pp. 1168-1176 (1993).

- [24] 天野 晃, 美濃 導彦, 池田 克夫, 坂口 嘉之, “再帰分割を用いた適応格子による距離画像からの3次元形状モデルの生成”, 電子情報通信学会誌, **J78-D-II**, 12, pp. 1841-1848 (1995).

<大会・研究会等>

- [25] 美濃 導彦, 坂口 嘉之, “物理的制約を考慮した仮想服飾環境の構築,” ロボティクス・メカトロニクス講演会'96 講演論文集 (Vol. B), 21 昼 17, pp. 1043-1046(1996).
- [26] 天野 晃, 美濃 導彦, 池田 克夫, 英保 茂, 松田 哲也, 三木 真司, 岡田 幾太郎, 河合 忠一, 坂口 嘉之, “Active Countour Model を用いた MRI 断層像からの左心室心壁の追跡,” 信学技報, MBE90-51, pp. 85-92(1990).
- [27] 天野 晃, 美濃 導彦, 池田 克夫, 坂口 嘉之, “サンプル輪郭モデルを利用した Snakes,” 信学技報, PRU91-84, pp. 47-54(1991).
- [28] 天野 晃, 美濃 導彦, 池田 克夫, 坂口 嘉之, “正則化を利用した距離画像からの三次元形状モデルの生成,” 信学技報, PRU92-58, pp. 1-8(1992).

<特許>

- [29] 坂口 嘉之, 駒井 茂, 山田 陽三, “衣服の立体形状計算方法,” 出願番号 PT05-031979(H05.02.22), 公開番号 PT06-248503(H06.09.06).
- [30] 坂口 嘉之, 駒井 茂, 山田 陽三, “構造格子形成方法,” 出願番号 PT06-007598(H06.01.27), 公開番号 PT07-210591(H07.08.11).

- [31] 坂口 嘉之, 駒井 茂, 山田 陽三, “衣服の立体形状形成方法,” 出願番号 PT06-177024(H06.07.28), 公開番号 PT08-044785(H08.02.16).
- [32] 坂口 嘉之, 駒井 茂, 山田 陽三, “3次元形状モデルからの衣類の型紙作成方法,” 出願番号 PT07-092950(H07.03.13).
- [33] 坂口 嘉之, 駒井 茂, 山田 陽三, “衣服の製造方法及び着装シミュレーション装置,” 出願番号 PT07-122781(H07.05.22).
- [34] 坂口 嘉之, 駒井 茂, 山田 陽三, “着装シミュレーション方法および着装シミュレーション装置,” 出願番号 PT07-184532(H07.07.20).
- [35] 坂口 嘉之, “ドレープ性シミュレーション方法およびドレープ性シミュレーション装置,” 出願番号 PT07-306292(H07.11.24).
- [36] 坂口 嘉之, “衣服の動きのシミュレーション方法,” 出願番号 PT08-030366(H08.02.19).

参考文献

- [37] 通産省生活産業局：“ファッション大国への道”，通産産業調査会 (1991).
- [38] 大野 静枝, 吉田 敬一, 飯塚 幸子, 久慈 るみ子, 多屋 淑子：“被服衛生・機構学”，朝倉書店 (1989).
- [39] 大内 順子：“20 世紀 日本のファッション”，源流社 (1996).
- [40] 加藤 陽一, 近藤 那雄：“アパレル産業におけるコンピュータグラフィックス”，情報処理, **29**, 10, pp. 1160-1164 (1988).
- [41] 今岡 春樹, 渋谷 惇夫：“衣服設計用CADの動向”，繊維学会誌, **48**, 6, pp. 78-83 (1992).
- [42] 佐藤 隆三：“アパレル産業のCAD・CAM化”，電学誌, **111**, 6, pp. 477-482 (1991).
- [43] 今岡 春樹：“服地・布の生成に関する研究動向”，グラフィックスとCAD, **40**, 14, pp. 93-98 (1989).
- [44] H. Imaoka: “Three models for garment simulation”, International Journal of Clothing Science and Technology, **8**, 3, pp. 10-21 (1996).
- [45] D. Terzopoulos, J. Platt, A. Barr and K. Fleischer: “Elastically deformable models”, Computer Graphics, **21**, 4, pp. 205-214 (1987).
- [46] D. Terzopoulos and K. Fleischer: “Deformable models”, The Visual Computer, **4**, pp. 306-331 (1988).
- [47] Y. M. Carignan and D. N. M. Thalmann: “Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes”, Computer Graphics, **26**, 2, pp. 99-104 (1992).

- [48] D. E. Breen, D. H. House and P. H. Getto: “A physically-based particle model of woven cloth”, The Visual Computer, **8**, 5-6, pp. 264-277 (1992).
- [49] D. E. Breen, D. H. House and M. J. Wozniak: “Predicting the drape of woven cloth using interacting particles”, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pp. 365-372 (1994).
- [50] D. H. House, R. W. DeVaul and D. E. Breen: “Towards simulating cloth dynamics using interacting particles”, International Journal of Clothing Science and Technology, pp. 75-94 (1996).
- [51] 松田 亮治, 今岡 春樹：“衣服設計のための濃度球を用いた人体形状モデリング”，繊維学会誌, **50**, 5, pp. 221-228 (1994).
- [52] 岸本 泰蔵, 紅野 進, 黒川 隆夫, 篠崎 彰大：“衣服CADのための人体3次元形状モデル”，1991 年第 22 回画像コンファレンス, **9-11**, pp. 235-238 (1991).
- [53] 今岡 春樹, 岡部 秀彦, 西川 茂, 渋谷 惇夫, 赤見 仁：“面要素を用いた衣服立体性の予測法”，繊維高分子材料研究所研究報告, **142**, pp. 73-80 (1984).
- [54] 佐伯 貴利, 博 傑, 上條 正義, 古川 貴雄, 清水 義雄：“衣服設計のための姿勢制御が可能な人体モデル”，繊維消誌, **37**, 3, pp. 44-50 (1996).
- [55] 亀田 能成, 美濃 導彦, 池田 克夫：“シルエット画像からの関節物体の姿勢推定法”，電子情報通信学会誌, **J79-D-II**, 1, pp. 26-35 (1996).
- [56] M. M. and W. J.: “Collision detection and response for computer animation”, Computer Graphics, **22**, 4, pp. 289-298 (1988).
- [57] N. M. Thalmann and D. Thalmann: “The direction of synthetic actors in the film rendezvous a montreal”, IEEE CG & A, pp. 9-19 (1987).

- [58] 西松 豊典, 酒井 哲也: “ドレープ性評価における注視点認識に関する研究”, 繊維学会誌, **45**, 8, pp. 354-360 (1989).
- [59] J. Weil: “Synthesis of cloth object”, Proc. SIGGRAPH'86, **20**, 4, pp. 49-54 (1986).
- [60] 今岡 春樹, 岡部 秀彦, 赤見 仁, 渋谷 惇夫, 相坂 登: “織物の変形解析”, 繊維学会誌, **44**, 5, pp. 217-228 (1988).
- [61] 今岡 春樹, 岡部 秀彦, 赤見 仁, 渋谷 惇夫, 相坂 登, 松田 亮治: “織物の二次元を例とした変形予測法”, 繊維学会誌, **44**, 5, pp. 229-237 (1988).
- [62] T.L.Kunii and H.Gotoda: “Modeling and Animation of Garment Wrinkle Formation Process”, Springer-Verlag, Tokyo (1990).
- [63] 安居院 猛, 金子 嘉和, 中嶋 正之: “電子計算機を用いた人台の3次元構成とその応用”, 電子通信学会論文誌, **J69-D**, 3, pp. 451-459 (1986).
- [64] 安居院 猛, 長尾 智晴, 中嶋 正之: “円筒状布地物体の表現手法—袖のしわのCGによる表現—”, 電子通信学会論文誌, **73-D-II**, 7, pp. 1095-1097 (1990).
- [65] M. Aono: “A wrinkle propagation model for cloth”, CG International '90, pp. 95-115 (1991).
- [66] 川端 季雄: “風合い評価の標準化と解析”, 日本繊維機械学会 (1980).
- [67] W. J. Shanahan, D. W. Lloyd and J. W. S. Hearle: “Characterizing the elastic behavior of textile fabrics in complex deformations”, Textile Research Institute, **48**, 9, pp. 495-505 (1978).
- [68] 篠原 昭: “織物の力学的異方性”, 繊維機械学会誌, **19**, 11, pp. 807-816 (1966).
- [69] Glassner: “An Introduction to Ray Tracing”, Academic Press (1989).

- [70] T. Yasuda, K. Suzuki, S. Yokoi, J. Toriwaki and K. Inagaki: “Artificial cloth feeling generated by an anisotropic light reflection model”, SIG Graphics and CAD, IPSJ, pp. 53-60 (1989).
- [71] H.Huges, D.Tony and D.Tom: “Mesh optimization”, Computer Graphics Proceedings (1993).
- [72] H.T.Tanaka and F.Kishino: “Surface reconstruction model for realistic visualization”, Trans, IEICE, **E76-D**, 4, pp. 494-500 (1993).
- [73] H.T.Tanaka and F.Kishino: “Adaptive mesh generation for surface reconstruction: Parallel hierarchical triangulation without cracks”, in Proceedings, IEEE International Conference on Pattern Recognition, pp. 88-94 (1993).
- [74] 天野 敏彦, 高田 和美, 川西 定子: “布のドレープ性の評価”, 繊消誌, **35**, 10, pp. 54-60 (1994).
- [75] S. J.L.: “Implicit finite-difference simulation of flow about arbitrary two-dimensional geometries”, AIAA J., **16**, 7, pp. 679-686 (1978).
- [76] F.Tsung-Pao and P.Les.A: “Delaunay triangulation using a uniform grid”, IEEE Computer Graphics & Applications (1993).
- [77] J.F.Thompson and Z.U.A.Warsi: “Numerical Grid Generation Foundations and Applications”, MIT press (1987).
- [78] 保原 充, 大宮 司久明: “数値流体力学”, 東京大学出版会 (1992).
- [79] H.T.Tanaka and F.Kishino: “Adaptive sampling and reconstruction for discontinuity preserving texture-mapped triangulation”, in Proceedings, IEEE Workshop on Directions in automated CAD-based Vision, pp. 298-305 (1994).

- [80] G. Mullineux: “CAD 図形計算手法”, 日刊工業新聞社 (1990).
- [81] B. D: “Analytical methods for dynamic simulation of non-penetrating rigid bodies”, *Computer Graphics*, **23**, 3 (1989).
- [82] U. T, O. T and T. M: “Collision detection in motion simulation”, *Computers & Graphics*, **7**, 3-4, pp. 285-293 (1983).
- [83] J. K. Hahn: “Realistic animation of rigid bodies”, *Computer Graphics*, **22**, 4, pp. 299-308 (1988).
- [84] T. W. Sederberg and S. R. Parry: “Free-form deformation of solid geometric models”, *Computer Graphics*, **20**, 4, pp. 151-160 (1986).
- [85] Y. Yang, N.M.Thalmann and D.Thalmann: “An improved algorithm for collision detection in cloth animation with human body”, *Computer Graphics and Applications*, proc, first pacific conf – Pacific Graphics '93, pp. 237-251 (1993).